

629

Л 75

Р. С. Ф. С. Р.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ В. С. Н. Х.

Ю. ЛОМОНОСОВ

ТЯГОВЫЕ
РАСЧЕТЫ

3-ье ИЗДАНИЕ

исправленное и дополненное.

Бюро Иностранной Науки и Техники
Берлин 1922

Р. С. Ф. С. Р.
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ В. С. Н. Х.

Ю. ЛОМОНОСОВ

ТЯГОВЫЕ
РАСЧЕТЫ

3-ье ИЗДАНИЕ

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

Бюро Иностранной Науки и Техники
Берлин 1922

Предисловие к третьему изданию.

З-ье издание печатается почти без изменения со второго. За недостатком времени мне не удалось его переработать заново, хотя к этой работе я приступил еще в 1916 году.

Приношу сердечную благодарность В. П. Любимову согласившемуся проредактировать это издание.

Ю. ЛОМОНОСОВ.

Берлин, 16 октября 1921.

Основные законы локомотивной тяги.

§ 1. Закон сцепления. Тяговые расчеты, т. е. определение времени хода поездов по перегонам, составов их и т. п., есть не что либо иное, как решение частных задач, относящихся к движению поезда, т. е. применение к частным случаям общих законов движения поезда. С изучения этих законов мы и начнем.

За исключением канатных дорог, перемещение поездов по рельсам совершается ныне помощью локомотивов, т. е. таких поезов, к некоторым осям которых приложены вращающиеся пары. Касательные усилия, составляющие эти пары, по отнесении их к ободу колес, как показано на фиг. 1, мы будем обозначать буквой F . Силы эти по отношению к колесу и всему поезду являются силами внутренними и потому не могут переместить его центра тяжести. Для этого необходимо наличие внешней силы, какой

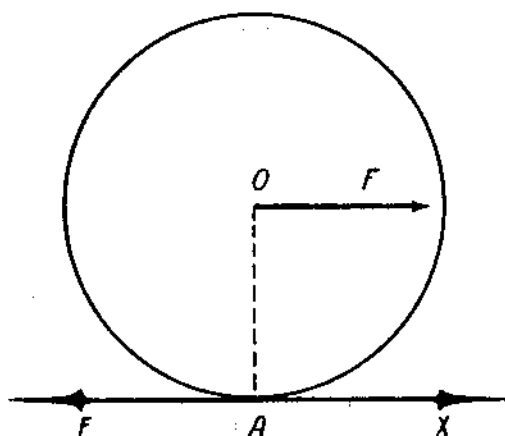
в данном случае является горизонтальная реакция рельса на колесо X . Пока

$$F \leq X$$

мгновенным центром вращения колеса является точка A , и оно катится вдоль рельса. Если же

$$F > X$$

колесо начнет вращаться вокруг точки O , остающейся на месте. Иными словами в этом случае произойдет боксование.



Фиг. 1.

Таким образом для того, чтобы поезд мог перемещаться вдоль пути, необходимо и достаточно, чтобы $F \leq X$. При гладких рельсах и колесах, а о них только мы и будем говорить в дальнейшем,

$$X = \varphi H,$$

где φ коэффициент трения первого рода между колесом и рельсом, а Π нагрузка на колесо. Таким образом для возможности перемещения необходимо, чтобы

$$F \leq \varphi \Pi,$$

или для всех движущих осей

$$\Sigma F \leq 1000 \varphi P_k \dots\dots\dots 1$$

где P_k — сцепной вес в тоннах, а ΣF в килограммах. Это и есть первый закон локомотивной тяги — закон сцепления. Коэффициент трения первого рода, как известно, зависит от скорости. В частности по отношению к трению между рельсами и колесами еще Пуарэ (Poigé, 1856) установил, что

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{1 + 0,02 V}, \quad ^1)$$

где φ_0 коэффициент трения при скорости равной нулю, а V скорость в километрах в час. В уравнении 1, однако, нужно всегда брать $\varphi = \varphi_0$, ибо реакция

$$X = \varphi \Pi$$

приложена в мгновенном центре, т. е. в точке, где $V = 0$.

§ 2. Уравнение движения поезда. Закон сцепления не дает нам понятия о характере движения поезда, он лишь устанавливает условия, при которых это движение возможно. Для решения же тяговых задач мы должны иметь уравнение движения поезда, связывающее перемещение поезда с временем. Такое уравнение и является вторым основным законом тяги. Его проще всего вывести из закона живых сил, гласящего, что приращение живой силы системы равно элементарной работе всех приложенных к ней сил.

С динамической точки зрения поезд представляет из себя систему твердых тел, связанных между собою частью жесткими, частью упругими связями и ограниченных в своем движении рельсовым путем, как неустойчивающей преградой. Одни из этих тел — кузова, имеют лишь поступательное движение, другие — скаты, кроме того, и вращательное. К этой системе приложены следующие силы:

1. касательные усилия F , приводящие поезд в движение и приложенные к ободу некоторых скатов,

¹⁾ Annales des mines, 1858, p. 271 ou Couche. Voie, materiel roulant et exploitation technique des chemins de fer. II (1873), p. 267—273.

2. силы, сопротивляющиеся движению поезда, как системы повозок; равнодействующую этих сил, приложенную в центре тяжести поезда, называют сопротивлением поезда — W_k .
3. реакция между отдельными частями поезда и
4. реакция между скатами и рельсами.

Элементарное перемещение скатов и центра тяжести поезда равно

$$ds = Rda,$$

где R радиус, а a угловое его перемещение; поэтому элементарная работа сил P и W_k есть

$$(\sum P - W_k) ds.$$

Элементарная же работа сил (3) и (4) равна нулю; первых потому, что каждой реакции $+P$ соответствует реакция $-P$, а вторых потому, что они приложены в мгновенном центре и, следовательно, их перемещения равны нулю.

Переходя теперь к живой силе поезда; обратим прежде всего наше внимание на то обстоятельство, что в то время, как живая сила каждого кузова равна

$$\frac{m_k V^2}{2}$$

живая сила каждого полуската, т. е. колеса с половиной оси равна

$$\frac{m_c V^2}{2} + \frac{I_c \omega^2}{2}$$

где I есть полярный момент инерции полуската, а ω его угловая скорость. Поэтому живая сила всего поезда равна

$$\frac{MV^2}{2} + \sum \frac{I_c \omega^2}{2}$$

где

$$M = \sum m_k + \sum m_c$$

есть масса всего поезда, а V его угловая скорость. Выражение это превращается в

$$\frac{MV^2}{2}$$

только в случае $\omega = 0$, т. е. тогда, когда колеса не катятся, а скользят по рельсам. Его можно еще преобразовать, пользуясь равенством,

$$V = R\omega,$$

Откуда для живой силы всего поезда мы получаем выражение

$$\frac{V^2}{2} \left(M + \sum \frac{I}{R^2} \right),$$

а для приращения ее

$$VdV \left(M + \sum \frac{I}{R^2} \right).$$

Приравнявая это последнее выражение элементарной работе, мы получим равенство

$$VdV \left(M + \sum \frac{I}{R^2} \right) = (\Sigma F - W_k) ds,$$

или, замечая, что

$$V = \frac{ds}{dt},$$

$$\left(M + \sum \frac{I}{R^2} \right) \frac{dV}{dt} = \Sigma F - W_k \quad \dots \dots \dots \text{II}$$

Это и есть уравнение движения поезда. При выводе его, так же как и при выводе закона сцепления, мы не делали никаких предположений о роде той энергии, которая была потреблена на получение сил F . Поэтому эти два закона являются общими для всякого рода локомотивной тяги: паровой, газовой, электрической и т. п.

§ 3. Замена в условии сцепления и в уравнении движения поезда суммы касательных усилий силою тяги. В той форме, как они написаны нами, законы эти, несмотря на их общность, неудобны для практического применения. Дело в том, что в них вошла сумма касательных усилий ΣF , которою только для электрической тяги можно считать постоянной в течение оборота колес. В других же локомотивах и в частности в паровозах ΣF резко меняется в зависимости от положения мотылей, т. е. от угла

$$\alpha = \omega t$$

Иными словами в общем случае силы ΣF содержат в себе время явным образом, что, как известно, чрезвычайно усложняет интегрирование уравнений движения системы. Чтобы избежать этих затруднений, во все расчеты вводится не мгновенное значение ΣF , а среднее значение этой суммы за оборот колес

$$F_k = \frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} \Sigma F ds \quad \dots \dots \dots 1$$

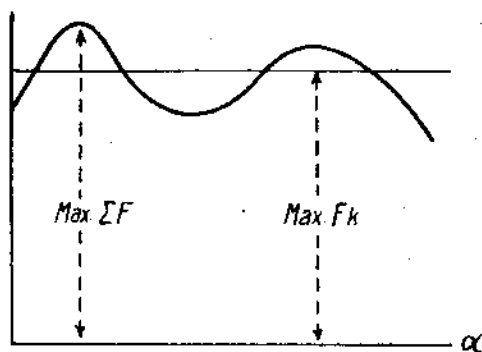
называемое *силою тяги*.

В уравнение движения поезда мы смело можем поставить вместо ΣF величину F_k , ибо поезд представляет из себя такой могучий маховик, что колебания скорости в пределах одного оборота, происходящие от того, что ΣF то больше, то меньше F_k , заключаются на практике между $1/300$ и $1/100000$ средней скорости; между тем даже на прядильных фабриках и на электрических станциях коэффициент неравномерности маховиков в $1/200$ считается идеалом.

Что же касается условия сцепления

$$\Sigma F \leq 1000 \varphi_0 P_k \quad \dots \quad (1)$$

то здесь простая замена ΣF на F_k — невозможна. Дело в том, что условие 1 должно быть соблюдено для всех значений ΣF ,



Фиг. 2.

в том числе и для максимального. Между тем $\max. \Sigma F$ заведомо больше $\max. F_k$, именно мы можем считать, что

$$\max. \Sigma F = (1 + \mu) \max. F_k$$

где μ правильная дробь; вставляя это выражение в (1), мы видим, что для возможности поступательного движения необходимо, чтобы

$$\max. F_k \leq 1000 \frac{\varphi_0}{1 + \mu} P_k$$

или

$$\max. F_k \leq 1000 \psi_k P_k \quad \dots \quad (2)$$

где

$$\psi_k = \frac{\varphi_0}{1 + \mu} \quad \dots \quad (2)$$

называют коэффициентом сцепления; он, очевидно, всегда меньше коэффициента трения φ_0 .

§ 4. Преобразование уравнения движения поезда. Возвратимся к уравнению движения поезда, которое мы представили под видом

$$\left(M + \frac{I}{R^2}\right) \frac{dV}{dt} = F_k - W_k,$$

и продолжим его преобразование. Прежде всего заметим, что

$$\sum \frac{I}{R^2}$$

имеет измерение массы, и потому ее можно представить, как часть массы поезда, т. е. положить

$$\sum \frac{I}{R^2} = \gamma M,$$

С другой стороны

$$M = \frac{(P + Q)}{g} 1000,$$

где P вес локомотива в тоннах, Q — вес вагонов, а g — ускорение свободно падающего тела. Поэтому уравнение движения поезда можно представить под видом

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{1000(1 + \gamma)} \frac{F_k - W_k}{P + Q},$$

или

$$\frac{dV}{dt} = \xi (f_k - W_k) \dots \dots \dots 1 \text{ г}$$

где

$$\xi = \frac{g}{1000(1 + \gamma)} \dots \dots \dots 3$$

есть некоторый постоянный коэффициент, имеющий измерение ускорения,

$$f_k = \frac{F_k}{P + Q}$$

сила тяги, отнесенная к одной тонне веса поезда, а

$$w_k = \frac{W_k}{P + Q}$$

сопротивление, отнесенное тоже к тонне веса поезда или, как говорят, удельное его сопротивление. Обе последние величины имеют нулевое измерение, т. е. выражаются отвлеченными числами.

§ 5. Численное значение величины ξ . Так как γ , W_k и f_k суть отвлеченные числа, то ускорение поезда из формулы

$$\frac{dV}{dt} = 1000 \frac{g}{(1+\gamma)} (f_k - W_k)$$

получается выраженным в тех же единицах, в каких выражено g . В физике его выражают обычно в m/sec^2 , но в железнодорожной практике скорости движения поезда выражают в km/h или в вер./час, сообразно чему dV/dt и g приходится выражать в km/h^2 или вер./час². В системе km, kgr, h , которой мы будем держаться в этой книге,

$$g = 9,81 \left| \frac{m}{sec^2} \right| = \frac{9,81 \cdot 3600^2}{1000} \left| \frac{km}{h^2} \right| = 127,$$

сообразно чему

$$\gamma = \frac{127}{1+\gamma} \dots \dots \dots 3a$$

В системе же верста, час

$$g = \frac{15}{16} 127 = 119$$

и

$$\gamma = \frac{119}{1+\gamma} \dots \dots \dots 3b$$

где как и раньше

$$\gamma = \frac{g \sum \frac{I}{R^2}}{1000(P+Q)} \dots \dots \dots 4$$

Для усиленной русской вагонной оси

$$g \sum \frac{I}{R^2} = 420 [kgr] = 25,6 [\text{пуд}]$$

поэтому для двухосного вагона

$$g \sum \frac{I}{R^2} = 840 [kgr] = 51,2 [\text{пуд}]$$

и

$$\gamma = \frac{51,2}{q}$$

где q вес груза и тары в пудах. Тара нормального русского вагона 420 пуд., предельная нагрузка 1000 пудов, поэтому для полногрузного нормального русского вагона

$$\gamma = \frac{51,2}{1420} = 3,6\%$$

а для порожнего

$$\gamma = \frac{51,2}{420} = 12,2\%$$

Что же касается паровозов, то по подсчетам Архангельского, произведенных под руководством проф. Жуковского, для тендерных скатов

$$\frac{I}{R^2} = 50,$$

а для паровозных

$$\frac{I}{R^2} = 19 + 100 R [m].$$

По этим данным значения

$$\frac{I}{R^2}$$

для пассажирских и старых товарных паровозов вместе с тендерами колеблются между 5 и 6‰; для новейших же товарных паровозов, как показывает таблица 1

Таблица I

Серия	О	Щ	Ы	Э	Е	Ө
$\gamma \text{‰}$	5,4	4,9	4,8	4,9	4,9	4,9

можно принять $\gamma = 4,9$.

Поэтому для полногрузных товарных поездов можно считать

$$\gamma \cong 4 \text{‰}$$

$$\dot{s} \cong 124 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}^2} \right],$$

а для порожних

$$\gamma \cong 11 \text{‰}$$

$$\dot{s} \cong 114 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}^2} \right]$$

Из сказанного следует, что при равных прочих условиях полногрузный поезд получит большие ускорения

$$\frac{dV}{dt} = \dot{s} (f_k - W_k)$$

чем порожний; иными словами оказывается, что порожний поезд инертнее груженого.

Для пассажирских восьмиколесных вагонов

$$g \sum \frac{I}{R^2} = 1600$$

$$\gamma = \frac{1600}{4000} = 0,04,$$

и потому для пассажирских поездов

$$\xi \approx 122 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}^2} \right].$$

Для приближенных же расчетов можно брать

$$\xi \approx 120$$

что, как мы увидим ниже, очень ценно для графических построений.

Для примера определим точное значение ξ для поезда, состоящего из паровоза Прери серии С и 9 восьмиколесных вагонов. Паровоз С имеет диаметр колес передней тележечной оси $= 1 \text{ [m]}^1$, спаренных колес 1,83 и заднего бегунка 1,16. Поэтому для него

$$\sum \frac{I}{R^2} = 5 \cdot 19 + 50 + 3 \cdot 91,5 + 58 = 478,$$

а для восьмиколесного тендера

$$\sum \frac{I}{R^2} = 4 \cdot 50 = 200;$$

для вагонов же

$$\sum \frac{I}{R^2} = 9 \cdot 160 = 1440.$$

Таким образом общее

$$\sum \frac{I}{R^2} = 478 + 200 + 1440 \approx 2120,$$

откуда при весе паровоза с тендером в 125 тонн и каждого вагона в 40 тонн

$$\gamma = \frac{2120}{(125 + 360) 1000} \approx 0,0437$$

и

$$\xi = \frac{127}{1 + \gamma} = 122$$

как это мы имели и раньше.

¹⁾ Кестлер. Курс паровозов (литограф. изд.) 1913, стр. 351.

§ 6. Сущность тяговых расчетов и условия, необходимые для их производства. Как мы увидим ниже, f_k и w_k суть скорости; поэтому для интегрирования уравнение движения поезда удобнее представить под видом

$$dt = \frac{dV}{\tilde{s}(f_k - W_k)}$$

Интегрируя его первый раз, мы получим

$$t - t_0 = \int_{V_0}^V \frac{dV}{\tilde{s}(f_k - W_k)} \quad \dots \dots \dots 5$$

или

$$V = q(t) \quad \dots \dots \dots 5a$$

Этот интеграл позволяет нам определить время нужное для изменения, под влиянием заданных сил, скорости поезда данного веса от V_0 до V . Интегрируя уравнение

$$V = \frac{ds}{dt} = q(t)$$

еще раз, мы получим

$$s - s_0 = \int_{t_0}^t q(t) dt \quad \dots \dots \dots 6$$

или

$$t = x(s) \quad \dots \dots \dots 6a$$

Этот интеграл позволяет определить время нужное для прохождения поездом под действием заданных сил данного элемента пути. Пользуясь этим интегралом, можно решить самую трудную тяговую задачу — определение поперегонных времен хода. Для этого надо разделить расстояние между станциями на такие участки, на которых к поезду приложены определенные силы. Вычисляя затем по формуле 6 для каждого из таких участков t , мы найдем искомое время как Σt .

Для решения же таких задач, которые сводятся к выяснению закона изменения скорости в зависимости не от времени, а от пройденного пути, уравнение движения поезда можно представить под видом

$$\frac{dV}{ds} = V \frac{dV}{dt} = \tilde{s}(f_k - W_k).$$

или

$$ds = \frac{V dV}{\tilde{s}(f_k - W_k)}$$

Интегрируя это уравнение, мы получим

$$s - s_0 = \int_{v_0}^v \frac{V dV}{s(f_k - W_k)} \dots \dots \dots 7$$

или

$$V = \varphi(s) \dots \dots \dots 7a$$

что и выражает собой закон изменения скорости в зависимости от пройденного поездом расстояния. К числу задач, сводящихся к решению такого уравнения относятся все тормозные расчеты, а также выяснение вопроса может ли поезд преодолеть данный подъем с разгона или нет.

Таким образом мы видим, что тяговые расчеты, сводятся к интегрированию уравнения движения поезда.

$$\frac{dV}{dt} = s(f_k - W_k) = s \frac{F_k - W_k}{P + Q}$$

или точнее к квадратурам 5, 6 и 7. Поэтому, для возможности производить эти расчеты необходимо наличие трех условий:

1. знания численных значений и законов изменения силы тяги паровоза,
2. тоже сопротивления поезда, включая и сопротивление от тормозов и
3. умение выполнять квадратуры 5, 6 и 7.

Точно также и точность тяговых расчетов обуславливается не только точностью выполнения квадратур 5, 6 и 7, но и надежностью выбранных значений F_k и W_k . К изучению этих величин мы и переходим.

Сила тяги паровоза.

§ 7. Общее выражение силы тяги паровоза в зависимости от размеров цилиндров. Выше уже было отмечено, что законы I и II общи для всех видов локомотивной тяги. Законы же изменения F_k , конечно, различны в зависимости от того, какой род энергии потрачен на реализацию этой силы. Что касается паровозов, то там сила F_k является результатом действия пара в цилиндрах. Однако, не вся работа, развиваемая в них, передается на колеса; часть ее поглощается внутренним трением машины. Поэтому для каждого цилиндра касательное усилие F представляет из себя равнодействующую мгновенного усилия на поршень P_r и сил внутреннего трения. Так как силы эти приложены не к одному твердому телу, а к системе их, то для нахождения равнодействующей мы должны воспользоваться принципом возможных перемещений, согласно которому элементарная работа равнодействующей в возможном перемещении равна сумме таких работ составляющих. Возможным перемещением сил F , приложенной к ободу, является ds , а силы P_r перемещение поршня dl . Поэтому для каждого цилиндра

$$Fds = P_r dl - dT_m,$$

где dT_m есть элементарная работа внутреннего трения. Для всех же цилиндров

$$\sum F = \sum P_r \frac{dl}{ds} - \frac{dT_m}{ds},$$

где dT_m обнимает внутреннее трение всего паровоза. Что же касается силы тяги

$$F_k = \frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} \sum F ds,$$

т. е. среднего за оборот значения $\sum F$, то, согласно, только что выведенных формул,

$$F_k = \frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} \Sigma P_x dl - \frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} dT_m,$$

где интеграл

$$\frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} dT_m = W_m$$

представляет среднее за оборот колеса значение равнодействующей всех сил внутреннего трения, т. е. то, что называется сопротивлением паровоза как машины. Интеграл же суммы

$$\int_0^{\pi D} \Sigma P_x dl = \Sigma \int_0^{\pi D} P_x dl,$$

при чем каждый из последних интегралов представляет работу пара в цилиндрах за оборот. Работа эта, как известно, равна

$$2 \frac{\pi d^2}{4} p_i l,$$

где d диаметр цилиндра, l ход поршня, а p_i среднее индикаторное давление. Поэтому

$$\frac{1}{\pi D} \int_0^{\pi D} \Sigma P_x dl = \frac{1}{2D} \Sigma d^2 l p_i,$$

откуда

$$F_k = \frac{1}{2D} \Sigma d^2 l p_i - W_m.$$

Если бы внутреннего трения не было, то сила тяги была бы равна

$$F_i = \frac{1}{2D} \Sigma d^2 l p_i \quad 8i$$

откуда

$$F_k = F_i - W_m \quad 9$$

или

$$F_k = \eta F_i = \eta \frac{1}{2D} \Sigma d^2 l p_i \quad 8k$$

где

$$\eta = \frac{F_k}{F_i} = 1 - \frac{W_m}{F_i} \quad 10$$

называют коэффициентом внутреннего трения. Силу же F_i , которой равнялась бы сила тяги, если бы $W_m = 0$, называют индикаторной силой тяги. В отличие от нее, истинную силу тяги F_k называют нередко касательной силой тяги или силой тяги на обод. Усилие же, с которым паровоз тащит поезд, и которое может

быть измерено динамометром, помещенным между тендером и первым вагоном, называют полезной силой тяги или силой тяги на крюке.

Формула 2 представляет наиболее общее выражение для силы тяги паровоза. В частности для двухцилиндрового паровоза некомпанунд

$$\Sigma d^2 l p_i = 2 d^2 l p_i$$

откуда получается классическая формула

$$F_k = \eta \frac{d^2 l}{D} p_i \dots \dots \dots 11$$

Что же касается паровозов компанунд, то, как известно, теоретически работа их не изменится, если бы такое же расширение произошло в одном большом цилиндре. Поэтому для них

$$F_k = \eta^m \frac{d^2 l}{2D} p_i \dots \dots \dots 12$$

где m число больших цилиндров, d их диаметр, а p_i среднее индикаторное давление рэнкинизированной диаграммы.

Среднее индикаторное давление p_i при всякой системе паровоза зависит от степени открытия регулятора и от отсечки; поэтому на первый взгляд кажется, что, меняя, эти последние, машинист может по своему произволу реализовать в каждый момент любую силу тяги. В действительности, однако, этот произвол ограничен тремя обстоятельствами: во-первых, во избежание боксования, должно быть соблюдено условие

$$F_k \leq 1000 \psi_k P_k.$$

во-вторых, увеличение открытия регулятора и отсечки имеет свои пределы, и после того, как регулятор открыт во всю, а переводный механизм совершенно спущен, увеличение силы тяги, даже независимо от боксования, далее невозможно; в третьих, с увеличением силы тяги будет возрастать и расход пара, а так как паровозная машина расходует пар только из своего котла, то произвол машиниста в смысле увеличения силы тяги ограничен еще возможностью остаться без пара.

Разберем эти ограничения подробнее.

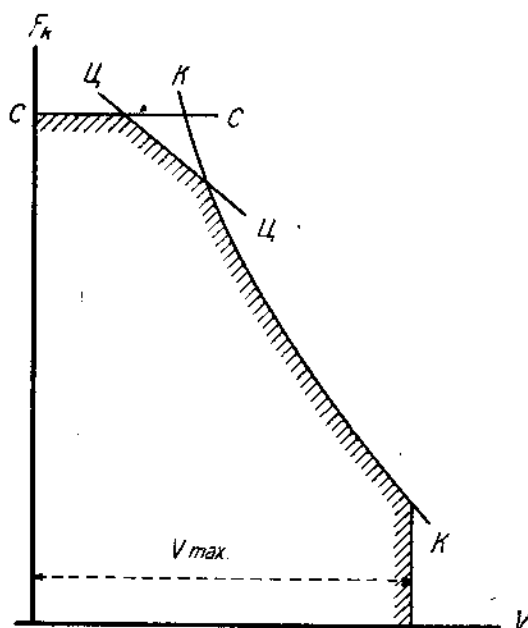
§ 8. Ограничение силы тяги по сцеплению. Предел силы тяги по сцеплению

$$Max. F_k = 1000 \psi_k P_k$$

определяется сцепным весом P_k и коэффициентом сцепления

$$\varphi_k = \frac{\varphi_0}{1 + \mu} \quad \dots \dots \dots 2$$

P_k для данного паровоза есть величина постоянная, φ_0 зависит только от состояния рельс, а μ от формы диаграммы касательных усилий. Поэтому в функции от скорости наибольшая возможная



Фиг. 3.

сила тяги по сцеплению представится в виде горизонтальной прямой C на фиг. 3. Для практических целей, однако, недостаточно доказать, что

$$Max. F_k = 1000 \varphi_k P_k$$

есть величина постоянная, надо еще уметь определить численное ее значение. Что касается φ_0 , то значения его для разных условий, согласно опытов Пуарэ (1856) и Гальтона (1878) приведены в таб. II.

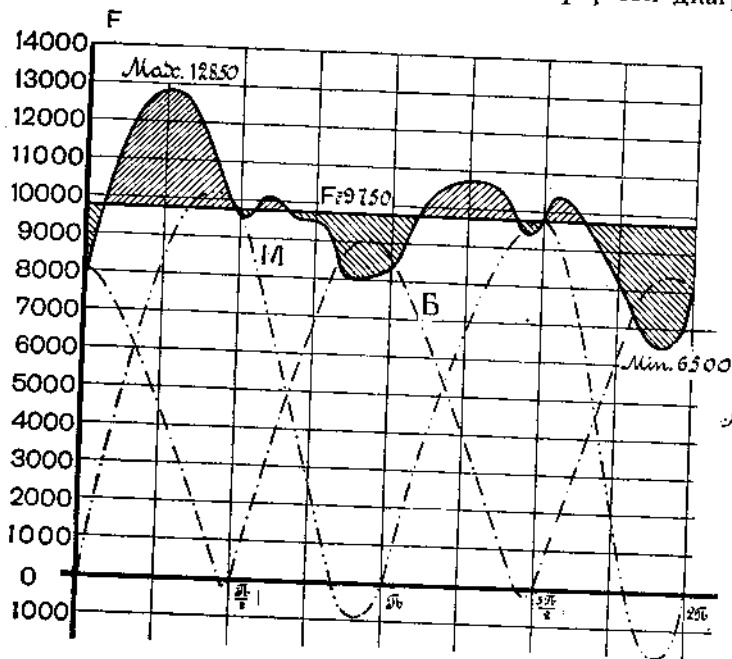
Табл. II.

Состояние рельсов	$\frac{1}{\varphi_0}$	φ_0
Совершенно сухие и абсолютно чистые	3	0,33
Посыпанные песком	3,5	0,28
Сухие пыльные или совершенно мокрые	4	0,25
Слегка влажные (роса)	5	0,20
При морозе и инее	6	0,17
На станционных путях и в тоннелях	8	0,13
При гололедице	10	0,10

В исключительных случаях, например при смазывании рельсов мылом, как это делают злоумышленники, при рельсах покрытых полугнилыми листьями, саранчей, змеями и т. п. коэффициент φ_0 имеет быть и ниже. В целях борьбы с подобными случайными уменьшениями коэффициента φ_0 предлагалось¹⁾ и предлагается очень много разных средств, но из них в железнодорожной практике удержалось только одно простейшее — посыпание рельс песком.

Это средство настолько распространено, что выбор расчетного значения φ_0 сводится, собственно говоря, к вопросу в какой степени мы предполагаем пользоваться песком. Если остановиться на $\varphi_0 = \frac{1}{5}$, то летом песок может потребоваться лишь в исключительных случаях; если взять $\frac{1}{4}$, то по утрам на подъёмы надо ездить с песком. Европейская практика и колеблется между этими пределами, в Америке же допускают φ_0 до $\frac{1}{3}$, т. е. употребление песка на подъёмах делают хроническим. В частности у нас в России при расчетах обычно берут летом $\frac{1}{4}\varphi_0 = 4,5 - 4,7$, а зимой $5,0 - 5,5$.

Что же касается величины μ , показывающей насколько $\max. \Sigma F$ больше $\max. F_k$, то она определяется формой диаграммы



Фиг. 4.

¹⁾ См. Voie, *Material roulant et exploitation technique des chemins de fer*, II, 1873. Стр. 279—289. Оттуда мы видим, что предлагающееся ныне намагничивание рельсов было испробовано еще в 50-х и 60-х годах минувшего столетия.

касательных усилий для наибольшего допускаемого в практике наполнения цилиндра; чем эта последняя (см. фиг. 4) ближе подходит к прямой, тем μ меньше. Поэтому в паровозах с симметричной машиной, где диаграмма ΣF получается путем сложения ординат двух идентичных кривых, μ меньше, чем в двухцилиндровых компаунд, где законы изменения давления в обоих цилиндрах неодинаковы. Наименьшее же μ получается у трехцилиндровых паровозов. Правильнее всего величину μ для каждого типа паровоза определять путем построения диаграммы касательных усилий по снятым с него индикаторным диаграммам.¹⁾ Как образец такой диаграммы, на фиг. 4 приведена диаграмма для паровоза О-4-О БЧ типа Армавир-Туапсинской дороги (2 цилиндрический компаунд с перегревом) при вполне открытом регуляторе, впуске в малый цилиндр 0,6 и скорости 9 км/ч. Для этих условий, согласно диаграмме, μ получилось равным 0,32.

Для предварительных же расчетов можно пользоваться средними значениями μ и ψ , приведенными в таблице III и выведенными на основании опытов как русских, так и иностранных.

Таблица III.

Тип паровоза	$1 - \mu$	Значение $\frac{1}{\psi}$	
		летом $1/\psi_0 = 4_{\text{н}}$	зимой $1/\psi_0 = 5_{\text{н}}$
Двухцилиндровый компаунд	1,3	6,0	7,0
Двухцилиндровый некомпануд или 4-цилиндровый (компаунд или некомпануд без различия)	1,2	5,5	6,5
Трехцилиндровый	1,1	5,0	6,0

§ 9. Ограничение силы тяги по размерам цилиндров. Формула 8 показывает, что сила тяги не может быть больше

$$F_k = \eta_m \cdot \frac{1}{2D} \Sigma d^2 p_m = F_u,$$

где η_m и p_m суть наибольшие возможные значения коэффициента внутреннего трения и среднего индикаторного давления. Обычно у нас наибольшее значение p_i определяют или по формуле Петрова

¹⁾ Подробности такого построения можно найти в разных учебниках, напр. см. Романов. Паровозы. 1903, стр. 45.

$$p_i = 0,95 p_k | (2 - \varepsilon) \varepsilon - 1,5^1)$$

или из таблиц фон Борриса, который дает для разных типов паровозов наибольшие значения

$$\eta = \eta \left(\frac{p_i}{p_k}, \dots \right)$$

где p_k есть давление в котле. И то, и другое безусловно неверно, ибо η и p_i для всех значений открытия регулятора и отсечки суть функции скорости. Это было указано еще Кларком³⁾ и подтверждено всеми новейшими опытами⁴⁾. Для примера на фиг. 5–6 приведены опытные кривые

$$F_k = \varphi(V)$$

для паровозов 0–4–0 нормального типа — компаунд (сер. О^в) и с перегревом некомпунд (сер. О^н); кривые эти соответствуют полному открытию регулятора и впускам, написанным на самых кривых. Из этих фигур мы видим что ограничение силы тяги по цилиндрам выражается в функции скорости не горизонтальной прямой, как это следует из формулы Петрова, а резко наклонной, как это изображено на фиг. 3 (Ц).

Точное построение такой прямой или вернее кривой возможно только после производства над данным типом паровоза специальных опытов, которые в настоящее время уже выполнены над большинством русских паровозов. Результаты их, необходимые для тяговых расчетов, опубликованы в виде так называемых „паспортных книжек“⁵⁾, где приведены и кривые F_k в функции скорости для разных наполнений и открытий регулятора. Выбирая из них кривую для полного открытия регулятора ($\varphi = 1$) и впуска $\varepsilon = 0,7$, мы найдем искомую кривую Ц. Для тех же паровозов, с которыми не было произведено подобных опытов,

¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. (1889), стр. 360. Мухачев. Теория и конструкция паровозов. Харьков. 1895, стр. 246.

²⁾ Blum, von Borries, Barkhausen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. I. (1903), стр. 78.

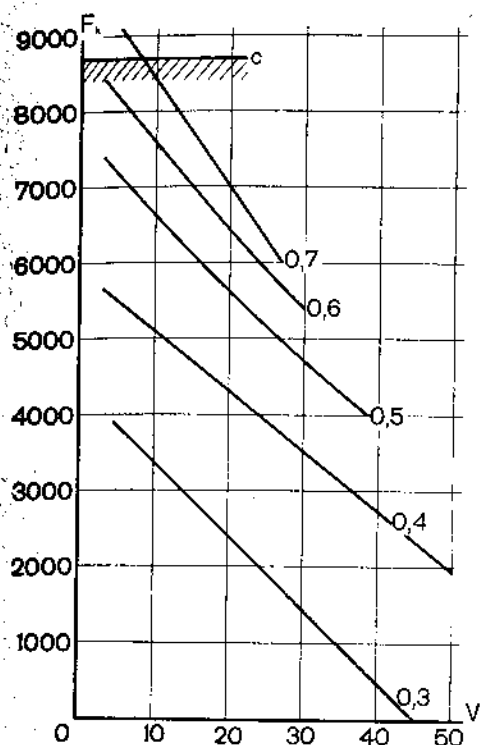
³⁾ Clark, Railway Machinery. 1861, стр. 67.

⁴⁾ На стр. 195 моего „Опытного исследования паровозов компаунд нормального типа“ приведена литература по этому вопросу. См. также: Чечотт. Новый метод расчета времен перегонов. 1910. Стр. 40. Теоретическое же обоснование падения F_k вместе со скоростью приведено в печатающейся сейчас II части „Сравнительного исследования товарных паровозов большой мощности“. Стр. 90, а равно в моей книге „Главнейшие результаты исследования товарных паровозов 0–4–0 и 1–4–0. Стр. 34.

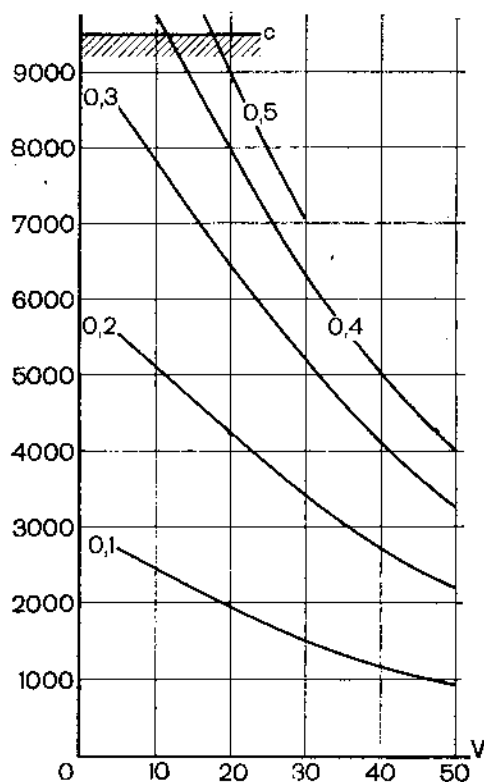
⁵⁾ Эти книжки издаются ныне техническим комитетом П. К. П. С. и рассылаются по дорогам.

ее можно построить на основании таблиц Надаля¹⁾, Брюкманна²⁾ и др. Считать же F_k постоянной нельзя ни в каком случае, ибо такое предположение может привести к серьезным ошибкам.

Впрочем надо иметь в виду, что ограничение силы тяги по цилиндрам имеет реальное значение только для паровозов компаунд, где впусками около 0,7 иногда приходится пользоваться.



Фиг. 5. 0-4-0 Oв.



Фиг. 6. 0-4-0 Oв.

Размеры же цилиндров у паровозов одиночного расширения обычно выбираются так, чтобы наибольшая сила тяги соответствовала впуску 0,40—0,45. Сказанное хорошо иллюстрируется фиг. 5—6. У паровоза O" даже впуск 0,5 по сцеплению возможен только при скоростях выше 17 km/h.

§ 10. Ограничение силы тяги по котлу. Сущность этого ограничения состоит в том, что машина паровоза не может продолжительное время расходовать пара более, чем его дает котел. Иными словами, в основу этого ограничения положено равенство

¹⁾ Revue Générale. 1901, II S., стр. 216, 221, 225, 235.

²⁾ Blum, von Borries, Barkhausen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. I. (1903), стр. 350.

$$U = zH, \dots \dots \dots 13$$

где U расход пара машиной, H поверхность нагрева, а z число килограмм пара, получаемое с одного квадратного метра этой поверхности. Если машина на получение одной паровой лошади расходует U/N_k килограмм пара, то U килограмм пара дает

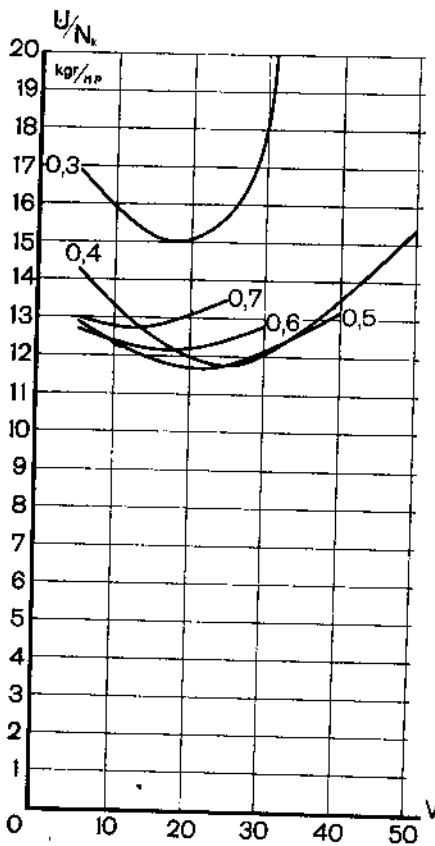
$$N_k = \frac{zH}{U/N_k}$$

паровых лошадей, иными словами — с одного метра поверхности нагрева мы получим

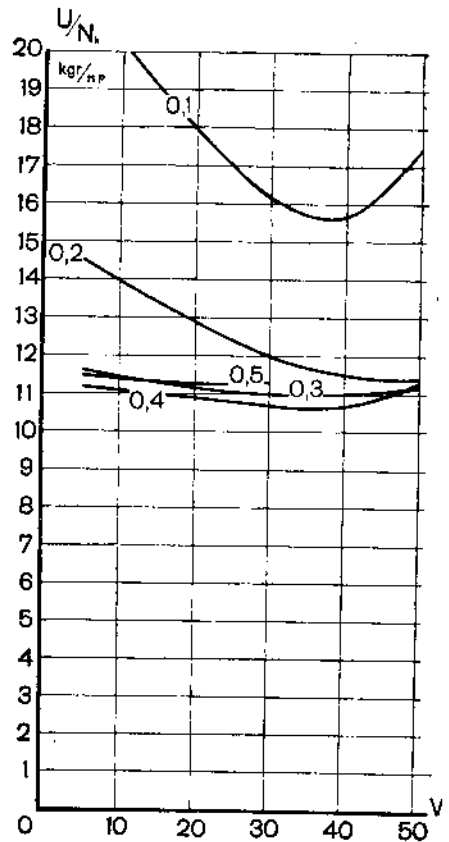
$$\frac{N_k}{H} = \frac{z}{U/N_k}$$

паровых лошадей. С другой стороны, число паровых лошадей

$$N_k = \frac{FV}{270}, \dots \dots \dots \text{III}$$



Фиг. 7. 0-4-0 О.



Фиг. 8. 0-4-0 Он.

вследствие чего

$$F_k = \frac{270 z H}{U/N_k} \frac{1}{V} \quad \text{Ша}$$

Если бы z и U/N_k , а значит и N_k были величинами постоянными, то, как показывает формула 10, сила тяги и скорость были бы связаны уравнением равноплечей гиперболы.

В действительности, однако, этого никогда не бывает. Величину z при умелом отоплении паровоза можно поддерживать постоянной; но величина U/N_k , характеризующая совершенство работы паровоза изменяется в зависимости от скорости, открытия регулятора и отсечки. Это наглядно видно из фиг. 7—8, где приведены кривые UN_k в функции скорости для паровозов 0—4—0 при разных наполнениях и вполне открытом регуляторе.

С другой стороны, так как часовой расход пара U есть тоже функция открытия регулятора ϱ , отсечки ε , и скорости V , то условие

$$U = z H \quad 13$$

можно переписать под видом

$$\Phi(\varrho, \varepsilon, V, z) = 0 \quad 13a$$

Кроме того, эти переменные связаны еще одним условием

$$\Psi(\varrho, \varepsilon, V) = 0 \quad 14a$$

выражающим требование, чтобы машинист комбинировал ϱ и ε наивыгоднейшим образом, т. е. чтобы при заданной работе

$$\frac{U}{N_k} = \min. \quad 14$$

Исключая, помощью условий 13 и 14, из выражения

$$\frac{U}{N_k} = \psi(\varrho, \varepsilon, V)$$

ϱ и ε , мы получим, что

$$\frac{U}{N_k} = \psi_k(z, V);$$

иными словами, благодаря зависимостям 3 и 4, мы в праве считать, что U/N_k зависит только от V и z .

Таким образом при заданном z

$$F_k = \frac{270 z H}{U/N_k} \frac{1}{V}$$

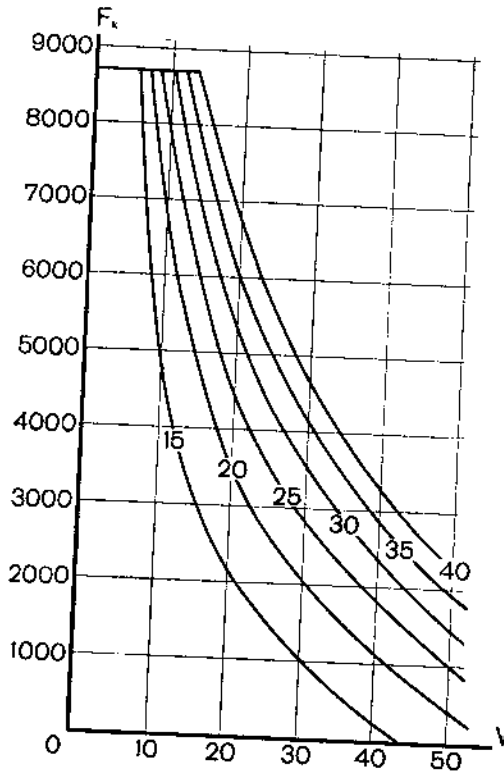
удаляется от равноплечей гиперболы постольку, поскольку U/N_k

зависит от скорости, и, надо сказать, что, несмотря на все разнообразие типов паровозов, для всех них кривая,

$$P_k = \frac{270 \pm H}{U \sqrt{N_k}} \frac{1}{V}$$

ограничивающая силу тяги по котлу, имеет (см. фиг. 3) ясно выраженный гиперболический характер.

Получить точное очертание подобной кривой можно только



Фиг. 9. 0-4-0, 0.

на основании опытов с данным типом паровоза; для примера результаты таких опытов с паровозами 0-4-0 нормального типа приведены на фиг. 9, где цифры на кривых означают соответственные z .

• Как уже указывалось, большинство типов паровозов, употребляющихся на русской сети, прошло через опыты и для них кривые

$$P_k = \varphi_k(z, V) \dots \dots \dots 15$$

приведены на литографированных таблицах, о которых речь шла выше. Если же необходимо вести расчеты относительно

паровоза, для которого подобные кривые еще не получены, то волей-неволей приходится прибегать к опытным данным, полученным над подходящими типами, и к эмпирическим формулам, выведенным из этих опытов. В ряду таких формул наибольшей известностью пользуются формулы Франка, который нашел, что паровозы Прусских дорог при отоплении их вестфальским углем при наибольших практически возможных τ дают

$$\frac{N_k}{H} = A + B | n,$$

где A и B суть постоянные, а n число оборотов в секунду.¹⁾ Формула эта теоретически исправлена, ибо согласно ей при $V = 0$

$$N_k = AH.$$

а не нулю, как это следовало бы ожидать.

Это неточность была исправлена Липецом, который показал, что данные опытов Франка укладываются лучше в формулу

$$\frac{N_k}{H} = \frac{a}{1 + \beta} | n,$$

чем в его собственную²⁾.

Т а б л и ц а IV. Значения $\frac{N_k}{H}$ по Боррису.

Тип паровозов			Число цилиндров	Число оборотов движущих осей:									
Пар	Расширение			1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	
Пассажирские	Насыщенный	Одиночное	2	—	4,2	4,5	4,8	5,0	5,2	5,3	5,5	5,6	
	"	Компаунд	2	—	4,5	5,1	5,6	6,0	6,4	6,7	6,9	7,0	
	"	"	4	—	5,9	6,3	6,7	7,0	7,2	7,4	7,6	7,7	
	Перегретый	Одиночное	2	—	7,0	7,5	8,0	8,3	8,8	9,0	9,2	9,3	
	"	Компаунд	2	—	7,5	8,5	9,3	10,0	10,7	11,2	11,5	11,7	
	"	"	4	—	9,8	10,5	11,2	11,7	12,0	12,3	12,6	12,8	
Товарные	Насыщенный	Одиночное	2	3,5	3,8	4,1	4,3	4,5	—	—	—	—	
	"	Компаунд	2	3,8	4,2	4,5	4,8	5,0	—	—	—	—	
	Перегретый	Одиночное	2	6,4	7,0	7,5	7,9	8,2	—	—	—	—	
	"	Компаунд	2-4	6,6	7,3	7,8	8,3	8,6	—	—	—	—	

¹⁾ Hütte, II часть, русское изд. 1909 г., стр. 823.

²⁾ Известия Варшавского Политехнического Института 1901. II выпуск.

Взамен формул Франка, фон-Боррис предложил известную таблицу, которая в своем последнем издании ¹⁾ приведена здесь полностью. Кроме того в недавнее время была еще предложена формула Рихтера

$$\frac{N}{H} = 0,775 (a - 0,6 n) \sqrt{n},$$

где a имеет значения, показанные в таблице V.

Т а б л и ц а V. Рихтер.

Пар	Расширение	Число цилиндров	a
Насыщенный	Одиночное	—	6,0
"	Компаунд	2	6,5
"	"	4	7,5
Перегретый	Одиночное	—	7,0
"	Компаунд	4	8,0

Чтобы оценить все эти формулы, на фиг. 10 сопоставлены кривые F_k , получаемые по ним для паровоза 0—4—0 нормального типа, с опытной кривой для этого паровоза при $z = 30$, что для угольного отопления является не всегда достижимым пределом. Из этой фигуры мы видим, что данные самых распространенных формул и таблиц весьма далеки от действительности и потому ими следует пользоваться с чрезвычайной осторожностью.

§ 11. Получение зависимости $F_k = \varphi_k(z, V)$ из опытных данных. Получить эту зависимость рядом непосредственных измерений нельзя, ибо на паровозах нет и не может быть такого прибора, который бы показывал, как велико в данный момент z . Поэтому для того, чтобы из опытных данных получить

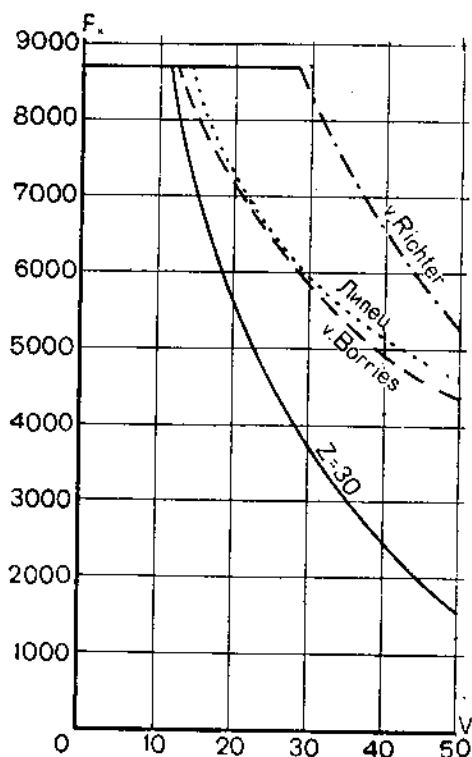
$$F_k = \varphi_k(z, V) \quad 15$$

их надо переработать определенным образом. Так как с одной стороны существует не мало паровозов, подвергавшихся довольно полному опытному исследованию, результаты которого не

¹⁾ Lotter. Handbuch zum Entwerfen regelspuriger Dampf-Lokomotiven 1909, стр. 13.

прошли через такую обработку ¹⁾, а с другой фиг. 10 наглядно показывает насколько полезно иметь опытную кривую F_k по котлу, то здесь уместно указать основные приемы этой обработки.

Исследование работы всякой паровой машины сводится к измерению ее работы и расхода пара. Результаты таких измерений можно представлять в самых разнообразных формах. В частности в паровозах наиболее удобно эти данные изображать для каждого открытия регулятора в виде двух пучков кривых,



Фиг. 10. 0-4-0, С⁶.

приведенных для паровоза 0-4-0 нормального типа при полном открытии регулятора на фиг. 11 и 12.

На второй из них даны кривые

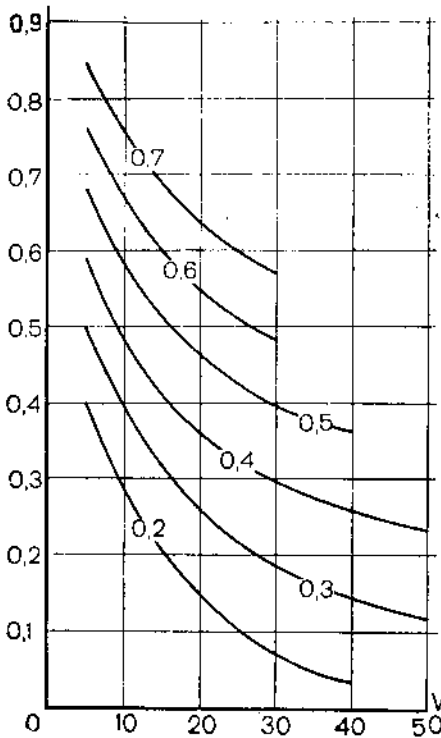
¹⁾ Например, паровозы серии Г (2-3-0), III (1-4-0) и Д (2-2-0) Влк. ж. д., результаты опытов над которыми изложены в приложении к протоколам XXV С. Съезда сл. тяги под заглавием „Исследования и опытные данные о работе паровозов трех новейших типов Влк. ж. д.“ или паровозы серии Р (1-4-0 М. В. Р. ж. д.), опытные данные о которых разбросаны в трудах А. О. Чечотта.

$$F = q(V)$$

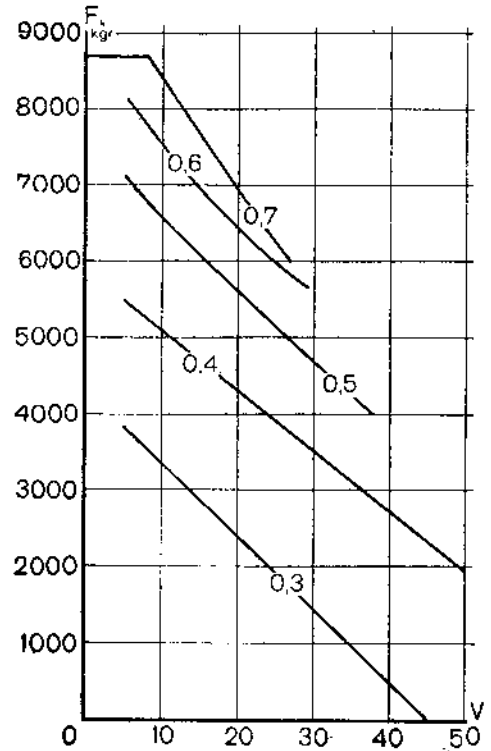
для разных наполнений, а на первой кривой расхода пара за один ход поршня

$$V = \psi(V)$$

для тех же наполнений. Задача обработки этих кривых, о кото-



Фиг. 11. $\theta-4-\theta$, O° .



Фиг. 12. $\theta-4-\theta$, O° .

рых сейчас идет речь, состоит в том, чтобы из первого пучка представляющего собой зависимость

$$F_k = \varphi(p, \varepsilon, V)$$

помощью условий

$$\varphi(p, \varepsilon, V, z) = 0 \quad \dots \dots \dots 13a$$

и

$$\psi(p, \varepsilon, V) = 0 \quad \dots \dots \dots 14a$$

исключить отсечку ε и открытие регулятора q и получить зависимость

$$F_k = \varphi_k(z, V) \dots \dots \dots 15$$

Как было указано выше, зависимость 13а представляет из себя ничто иное, как равенство

$$U = zH \dots \dots \dots 13$$

между расходом пара машиной и паропроизводительностью котла. Под символом U в этой формуле подразумевается часовой расход пара, а на фиг. 12 приведены значения расхода пара за один ход поршня u . Очевидно, между этими двумя величинами существует определенная зависимость. Именно

$$U = \kappa u x,$$

где κ есть число ходов поршня за один оборот движущих колес¹⁾, а x число оборотов в час. В свою очередь

$$x = \frac{10^6 V}{\pi D},$$

где D диаметр движущих колес в мм; откуда

$$U = \frac{10^6 \kappa V}{\pi D} u \dots \dots \dots (16)$$

Приравнявая это выражение к zH , мы видим, что в координатах u и V условие 13 приводится к уравнению равноплечей гиперболы

$$uV = \frac{zH\pi D}{10^2 \kappa} = \text{пост.} \dots \dots \dots 13б$$

Для примера на фиг. 13 такая гипербола для $z = 20$ нанесена на пучек кривых

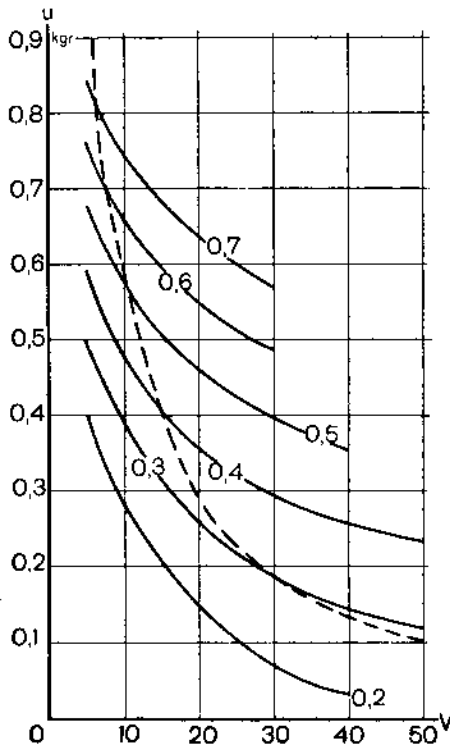
$$u = \varphi(V),$$

изображенный на фиг. 12. Она показывает, какое количество пара на один ход поршня должна расходовать машина при разных скоростях, если требуется, чтобы ее расход точно равнялся паропроизводительности котла, и если эта последняя равна 20 kgr. пара с 1 m² в час. Взаимное же расположение этой гиперболы и кривых

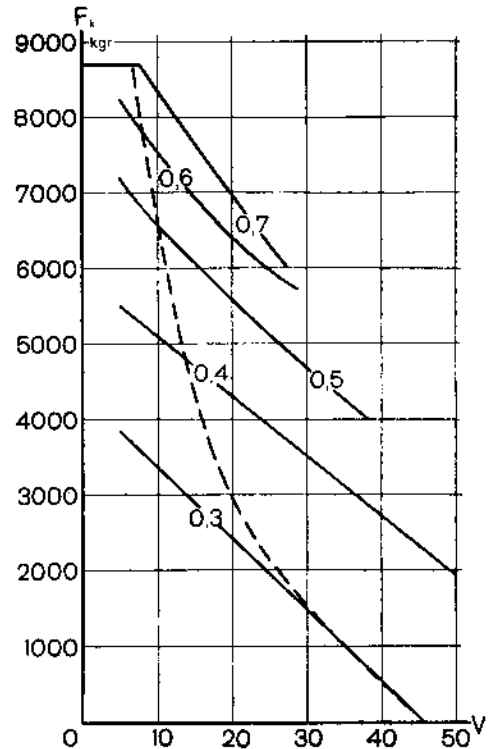
$$u = \varphi(V)$$

¹⁾ Для паровозов компаунд с двух цилиндрах $\kappa = 2$, для 4-цилиндровых компаунд и 2-цилиндровых некомпануд — 4, а для 4-цилиндровых некомпануд — 8.

указывает нам, как надо изменять отсечку с изменением скорости, чтобы это равенство не нарушилось. Например, если мы с отсечкой $\varepsilon = 0,5$ поведем со скоростью $V = 5$, то очевидно машина будет расходовать пара меньше, чем дает котел при $z = 20$; при скорости же 30 км/ч этой степени форсировки котла оказывается уже недостаточно для $\varepsilon = 0,5$; при скорости же 10 км/ч, где кривая и



Фиг. 13. 0—4—0, 0°.



Фиг. 14. 0—4—0, 0°.

для $\varepsilon = 0,5$ пересекается с гиперболой, расход пара машиной как раз соответствует $z = 20$.

Перенося поэтому скорости, соответствующие таким пересечениям, на соответственные кривые фиг. 11, мы найдем такие значения F_k , которые при полном открытии регулятора отвечают $z = 20$. Соединяя же, как показано на фиг. 14, эти значения F_k плавной кривой мы получим кривую

$$F_k = \varphi_1(z, V) \dots \dots \dots (*)$$

для вполне открытого регулятора. Иными словами мы исключили из выражения

$$F_k = \varphi(\varrho, \varepsilon, V)$$

помощью равенства

$$\Phi(\varrho, \varepsilon, V) = 0 \quad 13a$$

отсечку. Теперь нам остается из (*) исключить ϱ помощью равенств

$$\Psi(\varrho, \varepsilon, V) = 0 \quad 14a$$

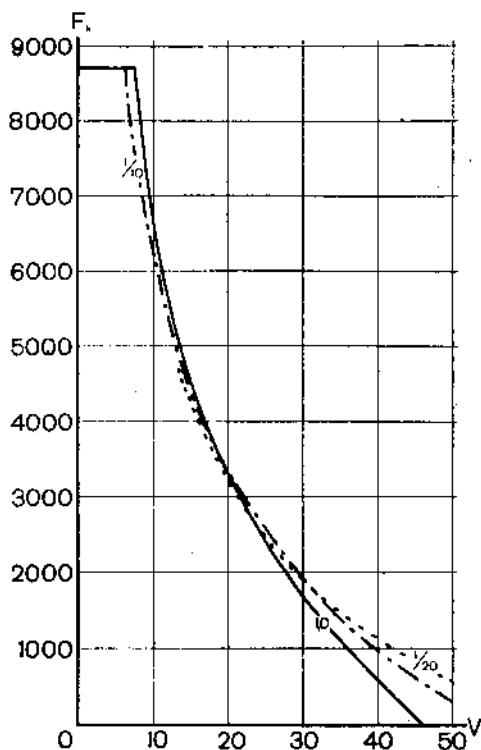
Для этой цели наносим на один планшет кривые

$$F_k = \varphi_1(z, V)$$

для $z = 20$, полученные указанным выше образом для разных открытий регулятора, как это сделано на фиг. 15. Так как все эти кривые соответствуют одному и тому же

$$V = z H,$$

то взаимное их расположение для разных ϱ обуславливается исключительно тем, что, при одной и той же скорости для разных ϱ значения



Фиг. 15.

$$\frac{U}{N_k} = \frac{270zH}{V} \frac{1}{F_k}$$

различны. Именно эта фигура показывает, что при $z = 20$ и скоростях до 20 km/h на паровозах нормального типа выгоднее всего ездить с вполне открытым регулятором ($\varrho = 1$), ибо при том же расходе пара это открытие дает наибольшую работу. При скоростях же между 20 и 30 km/h наивыгоднейшим открытием является $\frac{1}{10}$, а при скоростях больше 30 km/h — $\frac{1}{20}$ т. е. на малый клапан. Проводя поэтому на фиг. 15 обобщающую, мы получим искомую зависимость

$$F_k = \varphi(z, V)$$

для $z = 20$. Точно также получаются кривые и для других z .

§ 12. Распространение данных, полученных при опытах с одним типом паровоза, на другой. Могут быть случаи, когда для типа паровоза, для которого приходится производить тяговые расчеты не только нет, но и не может быть опытных данных,

например, при проектировании нового типа. В этом случае приходится или пользоваться формулами и таблицами, приведенными на стр. 27—28 или распространять на новый тип опытные данные, полученные для какого либо близкого к нему старого типа. Фиг. 10 и довольно удачное применение второго приема к паровозам, с которыми затем производились опыты, заставляют отдать предпочтение этому последнему. Конечно, нельзя данные, полученные при опытах с паровозом, работающим насыщенным паром, распространять на паровозы с перегревом, или данные, относящиеся к обыкновенному золотниковому распределению, на паровозы с машиной Штумпфа. Если же два паровоза отличаются друг от друга главным образом размерами машины, а не системы ее, то этот прием заслуживает полного доверия.

Вместо того, чтобы подробно описывать, как следует пользоваться этим приемом на практике, приведем в виде примера построение кривой

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

при $z = 50$ для непостроенного еще паровоза 2—3—1 Л. Влк. ж. д. на основании опытов с паровозом 2—3—0 К^у М. Казанской ж. д.

Оба эти паровоза некомпанунд с высоконеперегретым паром, но у К^у два цилиндра диаметром 580 м/м при ходе 650 м/м, а у Л четыре диаметром 460 м/м при ходе тоже 650 м/м. Сверх того у К^у давление в котле 13 кг/см² и диаметр движущих колес 1880 м/м, а у Л $p_k = 12$ кг/см² и $D = 1840$ м/м. Поэтому сила тяги на ободу для первого паровоза выражается формулой

$$F_k = \xi \eta \frac{d^2 l}{D} p_k \simeq 15000 \xi \eta,$$

где

$$\xi = \frac{p_i}{p_k}$$

есть отношение среднего индикаторного давления к давлению в котле, или так называемый индикаторный коэффициент, а для второго формулой

$$F_k = \xi \eta 2 \frac{d^2 l}{D} \simeq 18000 \xi \eta;$$

с другой стороны, в то время как для паровоза К^у зависимость между скоростью и числом оборотов в секунду выражается формулой

$$V = \pi D n \cdot 3,6 = 21,1 n,$$

для паровоза Л формулой

$$V = 20,0 n.$$

Поэтому, если предположить, что в обоих паровозах зависимость

$$\xi \eta = f(n)$$

тождественна, то для построения кривых

$$F_k = \varphi(\varrho, \varepsilon, V)$$

для паровоза Л, по таким же кривым для К^в, абсциссы этих последних надо уменьшить в отношении

$$\frac{20}{21,1} = 0,95,$$

а ординаты увеличить в отношении

$$\frac{18000}{15000} = 1,2.$$

Это и исполнено на фиг. 16 для наиболее употребительных комбинаций ϱ и ε в скорой службе, а именно, для впусков 0,4, 0,3 и 0,25 при вполне открытом регуляторе и для 0,25 при регуляторе открытом на $\frac{1}{15}$ и $\frac{1}{10}$.

Что же касается расхода пара за один ход поршня, то его при заданном наполнении можно считать пропорциональным объему цилиндров высокого давления и плотности пара при давлении в котле, т. е. считать что для паровоза К^в

$$u = \beta \cdot \frac{\pi d^2}{4} l \delta_k = \beta d^2 l \delta_k = 154 \cdot 10^4 \beta$$

а для Л

$$u = \beta 2 d^2 l \delta_k = 180 \cdot 10^4 \beta$$

Поэтому если считать, что зависимость

$$\beta = \varphi(n)$$

для обоих этих паровозов совершенно одинакова, то для перехода от кривых

$$u = \psi(\Gamma)$$

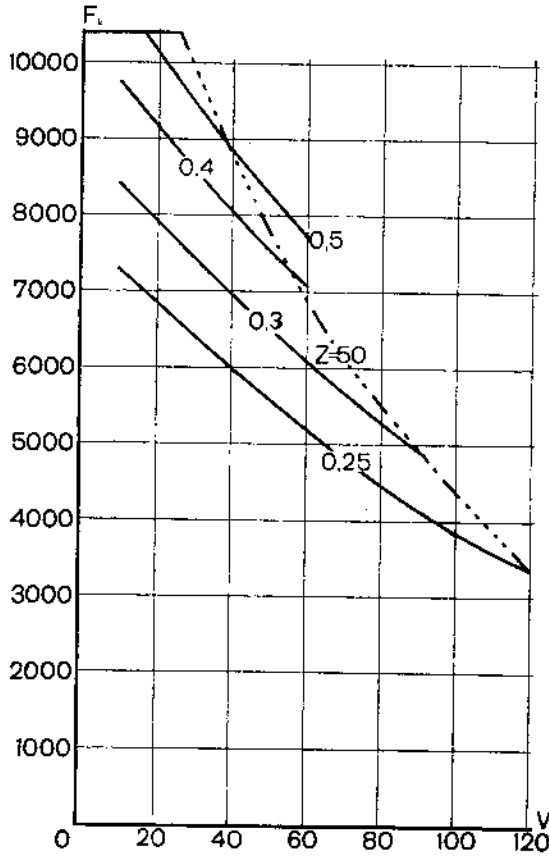
полученных для К^в к таким же кривым для Л ординаты первых надо увеличить в отношении

$$\frac{180}{154} = 1,17,$$

а абсциссы по прежнему уменьшить в отношении 0,95.

Кривые

$$u = \eta' (I')$$



Фиг. 16.

можно построить и иначе. Именно допуская, что у обоих паровозов кривые

$$\frac{U}{N_k} = f(V)$$

тождественны, мы можем на основании зависимости

$$N_k = \frac{F_k V_k}{270} \dots \dots \dots \text{III}$$

и затем провести к ним об'емлющую. Однако для предварительных расчетов можно применять более простой прием. Из опытов с паровозом K^y выяснилось, что уменьшать впуски ниже 0,25 на нем невыгодно; для реализации же малых F_k следует прикрывать регулятор. Полагая, что для паровоза L наимыгоднейшим окажется этот же прием управления паровозом, мы можем считать, что пунктирная кривая фиг. 16, полученная путем пересечения кривых фиг. 17 гиперболой

$$uV = \frac{50 H \pi D}{10^6 k}$$

и есть искомая кривая

$$F_k = \varphi_k(z, V).$$

Если у сравниваемых паровозов ходы поршня сильно разнятся между собой, правильнее строить кривые ξ и u не в функции числа оборотов, а в функции скоростей поршня.

§ 13. Выбор z . При пользовании кривыми

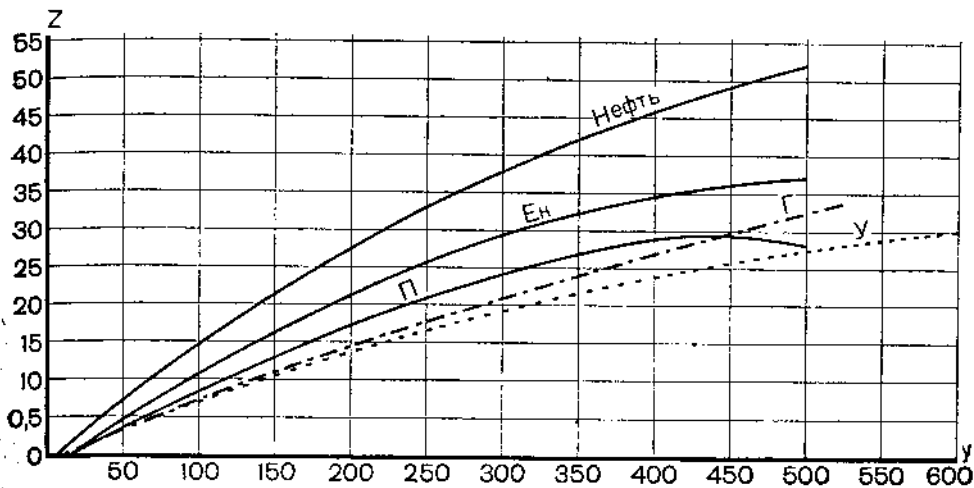
$$F_k = \varphi_k(z, V), \quad 15$$

безразлично полученными ли для данного типа паровоза из непосредственного опыта или путем указанным в предыдущем §, мы неизбежно сталкиваемся с вопросом, каким же z надлежит задаваться при расчетах.

Как известно, для каждого паровоза и сорта топлива существует вполне определенная зависимость между расходом пара и топлива, или, что то же, между z и числом килограмм топлива y , сжигаемым в час на 1 кв. метре площади решетки¹⁾. Примером такой зависимости могут служить кривые фиг. 18, полученные во время опытов над паровозами 0—4—0 нормального типа. Благодаря такой зависимости увеличение z неизбежно влечет за собой увеличение y , т. е. количества топлива сжигаемого в час. С другой стороны, как показывает фиг. 9, с увеличением z возрастает и сила тяги; иными словами, поезд данного веса можно везти по заданному участку с разными скоростями, в зависимости от того, сколько данного топлива мы будем сжигать в час.

¹⁾ Зависимости эти для разных сортов топлива приводятся в издаваемых для русских паровозов, прошедших через опыты, таблицах (паспортах). Исследованию этой зависимости у нормальных паровозов посвящена очень интересная брошюра инж. Крушевского: „Badania parównawcze węgla kamiennych z zagłęb Dombrowskiego, Donieckiego i Angielskich jako paliwa pod kotłem parowozowym.“ 1914.

Таким образом задача о выборе z сводится к выяснению, что выгоднее: возить поезд скорее или же меньше топлива. Вопрос этот чисто коммерческий и решение его находится в зависимости не только от условий пропускной способности, размеров издержек перевозки, но и от физических свойств перевозимых продуктов. Естественно, что рассматривать его во всей полноте в настоящей чисто технической книге было бы неуместно; и потому мы ограничимся лишь кратким изложением тех основных



Фиг. 18. 0—4—0, 0°.

Ек. Лучший спекающийся донецкий уголь; П—неспекающийся, ниже среднего; Г—Домбровский; У—Западно-Уральский.

выводов, к которым привели специальные исследования этого вопроса¹⁾.

Прежде всего может считаться доказанным, что для всякого типа паровоза и данных условий перевозок существует своя наивыгоднейшая степень форсировки котла z , которая соответствует наибольшей прибыли, получаемой дорогой. Величина такой форсировки с одной стороны, помимо типа паровоза и условий пропускной способности, зависит в значительной степени от цены топлива, а с другой стороны от того, насколько, в зависимости от рода перевозки, клиенты дороги склонны оплачивать увеличение V и z , т. е. от того в какой мере это увеличение можно компенсировать увеличением тарифов. Например, при перевозке руды или удобрительных туков увеличение z за пределы, определяемые

¹⁾ Известия Общего Бюро Совещательных С'ездов. 1912. Стр. 1126. Ломоносов. „Научные Проблемы.“ 1914, стр. 201.

минимумом себестоимости, очевидно не выгодно, ибо никто не согласится отправлять их большой скоростью по повышенному тарифу; при перевозке же высокоценных и скоропортящихся грузов, и особенно людей, увеличение скорости и z до известного предела охотно оплачивается клиентами дороги. Независимо от сего, паровозы с перегретым паром вообще требуют больших z , чем с насыщенным. Нефть, как показывает фиг. 18, допускает значительно большие z , чем уголь; при одном и том же топливе, чем оно дороже, тем менее выгодно увеличивать z .

Из сказанного делается ясным, что разыскание наивыгоднейшего z представляет из себя задачу чрезвычайно сложную и притом выходящую за пределы компетенции тех инженеров, которым приходится вести тяговые расчеты. К счастью колебания z вблизи наивыгоднейшего ее значения чрезвычайно слабо отражаются на величине издержек перевозки. Поэтому некоторая ошибка в выборе z не влечет за собой серьезных последствий. Кроме того выбор z в значительной степени ограничен формой кривой

$$z = \varphi(y)$$

для данного топлива. Из фиг. 18, например, очевидно, что, сколько бы выгодно не было форсировать котел, при неспекающихся доонецких и уральских углях, получить на нормальном паровозе z больше 28 — 30 $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}$. — совершенно невозможно.

Все это дает мне право для выбора z при расчетах, не претендующих на особую точность, предложить табл. VI. Цифры, приведенные в ней обыкновенным шрифтом, проверены специальными опытами и экономическими подсчетами, а цифры, приведенные курсивом взяты до известной степени наугад, на основании опытов с другими паровозами.

§ 14. Колебания z . Как бы мы ни определяли наивыгоднейшее z , от него в действительности постоянно приходится отказываться. Во-первых, по условиям расположения станций и разъездов на затяжных под'емах, очень часто оказывается, что уложить на график требуемое число поездов возможно только при некотором увеличении скорости движения по этим под'емам против той, которая определяется наивыгоднейшим z . Во-вторых, на площадках и легких уклонах наивыгоднейшее z очень часто дает такие скорости, которые превышают дозволенные по конструкции пути и паровоза. В-третьих, даже при возможности держаться наивыгоднейшего z на практике, достичь этого чрезвычайно трудно, ибо такой способ управления паровозом, особенно при волнистом профиле, требовал бы непрерывного

Серия паровоза	Тип паровоза	Нефть	Хорошие сибирские и домбров- ские угли	Угли уральские, подмо- сковные и плохие до- нецкие
О ¹ , О ² , О ³	0—4—0 нормального типа . . .	23—40	23—30	22—25
О ⁴	Тоже некомпануд с перегре- вом	25—40	25—35	23—28
Щ	1—4—0 изм. китайского типа . .	20—30	18—25	18—25
Щ ¹	Тоже некомпануд с перегре- вом	25—45	20—35	20—28
Ы ¹	0—4—0 Армавир—Туапсинской ж. д. с перегревом	25—40	25—35	23—28
Н ¹ , Н ² , Н ³	1—5—0 типа Ник. ж. д.	40—60	35—50	30—35
С	1—5—1 Прери	35—45	30—40	25—30
Б	2—5—0 типа Брянского зав. . .	35—50	30—40	20—25
К	Тоже Коломенского завода . .	35—50	30—45	25—30
К ²	Тоже М. Казанской ж. д. . . .	35—50	30—45	—
У	2—5—0 типа де Глева без пере- грева	40—55	—	—
У ²	Тоже с перегревом	40—55	—	—

изменения положения регулятора и переводного механизма, что помимо прочего отвлекало бы внимание машиниста от пути и сигналов. В четвертых, специальные исследования показывают, что желательно как можно шире пользоваться абсолютно наилучшими наполнениями, т. е. такими, для которых

$$\frac{U}{N_t} = \min 14$$

Иными словами, оказывается, что сохранение наивыгоднейшего далеко не всегда возможно, а иногда даже и невыгодно.

А если так, то естественно возникает вопрос, правильно ли мы решали задачу об исключении из выражений

$$\frac{U}{N_b} = \varphi(\varrho, \varepsilon, V)$$

и

$$F_k = \varphi(\varrho, \varepsilon, V)$$

открытия регулятора ϱ и отсечки ε помощью условий

$$\Phi(\varrho, \varepsilon, V, z) = 0 \quad 13a$$

и

$$\Psi(\varrho, \varepsilon, V) = 0 \quad 14a$$

Именно мы пользовались ими в том порядке, как они написаны, т. е. сперва мы находили из первого условия комбинации ϱ , ε и V , соответствующие данному z , а затем из числа этих комбинаций брали те, которые давали наименьшие значения U/N_k . Между тем, как согласно сказанному, представляется как будто более правильным сперва определить абсолютно наивыгоднейшие комбинации ϱ , ε и V , а затем из них взять такие, которые, во-первых, технически осуществимы, а во-вторых, которые наилучшим образом удовлетворяют противоречивым требованиям пропускной способности, предельных скоростей и коммерческих подсчетов о наивыгоднейшем z .

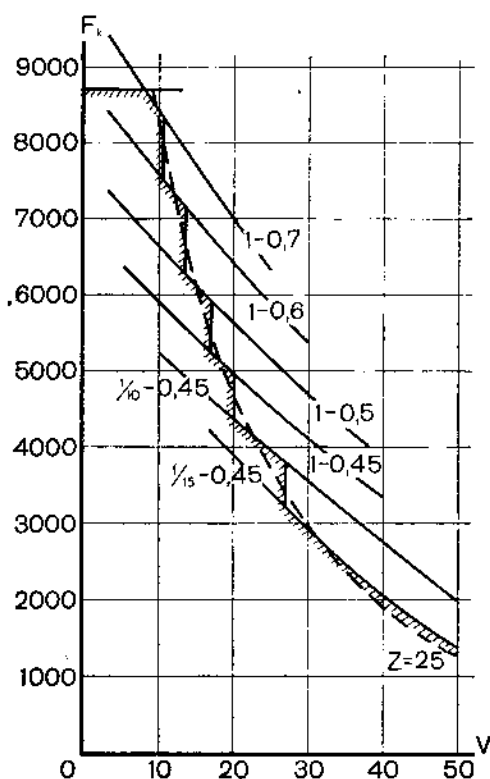
Для того, чтобы выяснить этот, очень для нас важный, вопрос, обратимся к частному примеру и посмотрим, насколько та или иная последовательность в получении кривой

$$F_k = \varphi_k(z, V) \quad 15$$

может отразиться на ее очертании.

Пусть на некотором участке для паровоза 0—4—0 компаунд нормального типа при отоплении средним донецким углем допускаящим $z \leq 30$, коммерчески наивыгоднейшей форсировкой котла является $z = 25$. Иными словами для этого случая по коммерческим соображениям следует пользоваться кривой 25 фиг. 9, перенесенной в виде пунктирной кривой на фиг. 19. Фактическое же осуществление такого требования будет приближаться к кривой, отмеченной на этой фигуре штриховкой, ибо в действительности изменение ϱ и ε будет производиться скачками, а не непрерывно. По идее же обе эти линии построены совершенно одинаково. Именно сперва были найдены такие комбинации, которые удовлетворяют условию $z = 25$, а затем из них отобраны те, которые сверх того удовлетворяют условию наивыгоднейшего регулирования машины. Для данного паровоза это последнее сводится к тому, чтобы значения силы тяги меньше, чем даст при данной скорости $\varrho = 1$ и $\varepsilon = 0,45$, осуществлять не дальнейшим уменьшением отсечки, а прикрыванием регулятора.

Абсолютно же наивыгоднейшими комбинациями для этого паровоза, как показывает фиг. 7 и другие подобные для $\varrho < 1$,¹⁾ для скоростей меньших 25 km/h является $1-0,5$, т. е., $\varrho = 1$, $\varepsilon = 0,5$, а для $V > 25 \dots 1-0,45$. Пользуясь этими абсолютно наивыгоднейшими комбинациями в пределах от $z = 20$ до $z = 30$, мы получим для силы тяги эюру, показанную на фиг. 20 заштрихованными линиями. Разница между этой эюрой и той, которая приведена на фиг. 19, состоит в том, что на этой последней мы,



Фиг. 19.

как указано, сперва пользовались условием заданной форсировки котла,

$$\Phi(\varrho, \varepsilon, V, z) = 0,$$

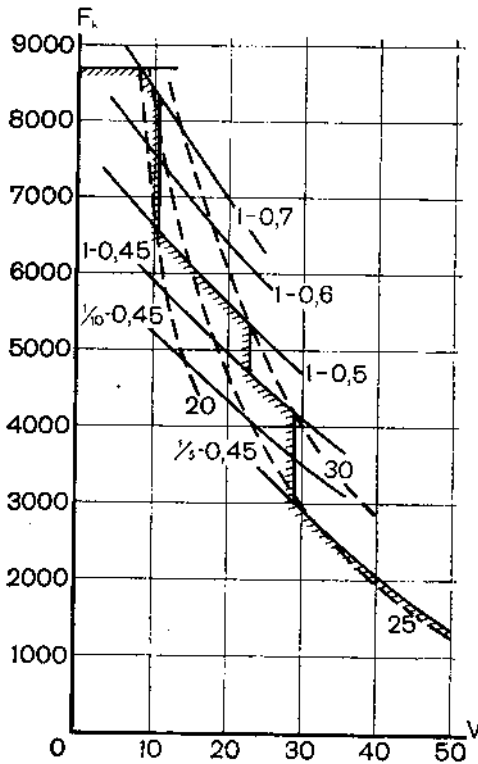
и потом уже условием наивыгоднейшего регулирования машины

$$\Psi(\varrho, \varepsilon, V) = 0,$$

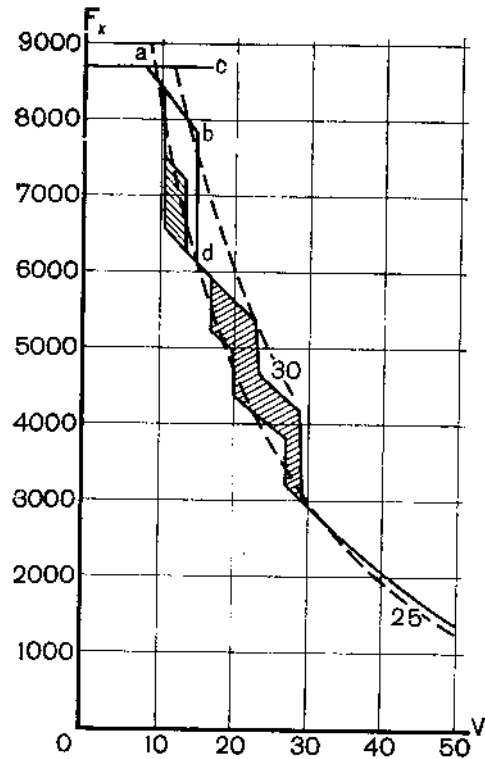
а на фиг. 20 наоборот.

¹⁾ Эти кривые легко получить из кривых F_k и η , приводимых в „паспортах“, помощью формул III и 16.

Сопоставим теперь, как это сделано на фиг. 21, эти эпюры между собой. Такое сопоставление, являясь ответом на поставленный нами вопрос, дает сверх того возможность сделать ряд чрезвычайно интересных выводов. Во-первых, оно показывает, что разница между этими двумя эпюрами не очень велика. Во-вторых, из него очевидно, что если мы будем постепенно уменьшать величину допускаемых колебаний ε , то в пределе обе сту-



Фиг. 20.



Фиг. 21.

пенчатые кривые сольются с пунктирной кривой $\varepsilon = 25$. Иными словами, вся разница между эпюрами, представленными на фиг. 21 сводится к тому, что на второй из них мы допускаем большие колебания ε , чем на первой. В-третьих, из той же фигуры следует, что ограничение скорости по пропускной способности, например, до 15 км/ч, как это там показано, еще более сглаживает разницу между обеими эпюрами, ибо обе в этом случае на протяжении abd сольются между собой.

Здесь, однако, возникает новый вопрос, осуществимо ли подобное очертание эпюры силы тяги, пересекающее кривую

$$F_k = \varphi_k(\varepsilon, V)$$

для предельного возможного по кривой

$$z = \phi(y)$$

значения z (в данном случае $z = 30$). Этому вопросу посвящен следующий §.

§ 15. Займы у котла. Только что поставленный вопрос в свою очередь сводится к вопросу, в какой мере условие

$$U' \leq z_{\max} H$$

имеет абсолютный характер, или что тоже, можно ли хотя в течение короткого времени допускать значения

$$U > z_{\max} H.$$

Повседневная практика решает этот вопрос в положительном смысле, ибо наши машинисты весьма часто на трудных местах расходуют, за счет понижения уровня в котле, гораздо больше пара, чем его дает котел, и затем на легких местах „поправляются“, т. е. пополняют уровень воды в стекле за счет превышения паропроизводительности котла над расходом пара машиной. Благодаря этому при волнистом профиле оказывается возможным пользоваться абсолютно наивыгоднейшими комбинациями далеко за пределами $z = z_{\max}$, определяемого по кривой

$$z = \phi(y).$$

Вызываемый же этим перерасход пара покрывается с одной стороны сохранением наивыгоднейших комбинаций и при таких скоростях, при которых по работе котла их можно было бы увеличивать, а с другой стороны широко пользуясь возможностью „поправляться“ на уклонах при закрытом регуляторе.

Для задач практики безразлично, как колеблются z на перегонах, и насколько на отдельных верстах нарушается условие

$$U' \leq z_{\max} H:$$

нужно лишь, чтобы поезд данного веса был перевезен по данному перегону в течение некоторого времени, определяемого пропускной способностью и коммерческими соображениями, с наименьшим расходом топлива, при чем скорости не должны превышать предельного, а уровень воды не падать ниже наивысшего дозволенного. Между тем специальные исследования этого вопроса ¹⁾

¹⁾ Чечотт. Новый метод расчета времен перегонов. 1910. Главы XXV—XXVI.

и опыты, производившиеся автором на Ек. (1908) и Ник. (1913) жж. дд., показывают, что в отдельных случаях широкое использование возможности для машины делать займы у котла может значительно уменьшить при равных прочих условиях расход топлива на данном перегоне. Более того не будет преувеличением сказать, что искусство управлять паровозом главным образом сводится к умению делать подобные займы и своевременно отдавать их обратно.

Таким образом в действительности изменения силы тяги вовсе не следует тому сравнительно простому закону, который был установлен в §§ 7—14, да и вообще не следуют никакому закону, а обуславливаются произволом машиниста, его опытностью, искусством и даже настроением. А если это так, то возникает коренной вопрос какими же данными о силе тяги следует пользоваться при тяговых расчетах и какую степень достоверности могут иметь эти последние.

Раз мы умеем интегрировать точно уравнение движения поезда и имеем надежные данные о сопротивлении поезда, можно быть уверенным, что, какими бы значениями о силе тяги мы не задались, для этих значений мы получим правильное решение любой из тяговых задач. Вопрос значит в том, насколько можно быть уверенным, что в действительности машинисты будут реализовывать именно эти значения силы тяги, а не другие. Можно, конечно, задаваясь разными законами ее изменения, путем ряда попыток, найти наивыгоднейшее решение данной задачи и затем выдать машинистам подробную инструкцию управления паровозом. В некоторых случаях такой прием вполне целесообразен, но нельзя забывать, что он, во-первых, требует весьма значительной затраты денег и труда на производство расчетов, а во-вторых, возможен только в том случае, когда для данного паровоза имеются подробные опытные данные о силе тяги.

Для расчетов же, не претендующих на особую точность, как, например, все расчеты для проектируемых дорог, или расчеты времен хода товарных поездов для дорог, где пропускная способность еще не исчерпана, не только можно, но и должно пользоваться кривыми

$$F_k = \varphi_k(z, V),$$

или как говорят „вести расчеты по z “. Правда, в действительности управление паровозом будет уклоняться от этих кривых, но отклонения эти будут направлены к тому, чтобы выиграть или во времени или в расходе топлива. Таким образом при расчетах по z мы имеем уверенность, не только в том, что полученное

нами решение практически выполнимо, но и в том, что в нем есть скрытый запас на искусство машиниста, благодаря которому можно будет при опозданиях иметь нагоны, а при нормальных условиях некоторую экономию в топливе. Наличие же такой уверенности с хозяйственной точки зрения имеет значительную ценность.

§ 16. **Двойная тяга.** Вообще говоря, применение двойной тяги, как системы, осуждено современной железнодорожной практикой. Однако, в отдельных случаях применение ее может быть выгодно; и потому едва ли можно обойти молчанием вопрос, как в этом случае следует строить эпюру силы тяги.

Казалось бы, что по закону сложения сил общая сила тяги обоих паровозов F_k во всяком случае равна сумме сил тяги переднего F'_k и заднего F''_k паровозов. Однако, условие

$$F_k = F'_k + F''_k$$

далеко не всегда имеет место. Дело в том, что при сношении между машинистами только посредством паровозных свистков, достичь согласованности в действиях обоих машинистов довольно трудно; а так как ведет поезд передний машинист, а задний же лишь исполняет распоряжения, то его действия носят всегда некий элемент неуверенности. Поэтому правильнее считать, что

$$F_k = F'_k + \beta F''_k, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17$$

где β есть правильная дробь, которую можно назвать коэффициентом согласованности.

Что же касается цифровой величины этого коэффициента, то она зависит от формы применения двойной тяги. Если оба паровоза идут в голове поезда, то β берут от 0,95 до 0,80 в зависимости от качества балласта и скорости. Дело в том, что при сильной пыли опасность нагрева во втором паровозе, настолько увеличивается, что реализовать на нем большие усилия довольно рискованно.

При расположении же заднего паровоза в хвосте, т. е. при подталкивании, когда ни о какой согласованности в действиях машинистов и речи быть не может, β благоразумнее брать между 0,7 и 0,8.

§ 17. **Сила тяги при закрытом регуляторе.** Паровозам в отличие от других машин очень часто приходится двигаться без пара, т. е. при

$$p_i = 0.$$

В этом случае, очевидно, индикаторная сила тяги

$$F_i = \frac{1}{2D} \sum d^2 l_{pi} = 0$$

но касательная сила тяги

$$F_k = F_i - W_m$$

не равна нулю, а принимает отрицательное значение — W_m . Иными словами при закрытом регуляторе сила тяги на обода движущих колес равна сопротивлению паровоза, как машины с обратным знаком. Этот вывод принадлежит Г. В. Лебедеву.

При этом надо иметь в виду, что сопротивление паровоза, как машины при движении без пара больше чем с паром, ибо в первом случае к трению в частях движущего и парораспределительного механизмов прибавляется еще сопротивление воздуха, перекачиваемого поршнями с одной своей стороны на другую¹⁾. Поэтому формулы для W_m , выведенные для работы паровоза с паром, не применимы для случая движения паровоза с закрытым регулятором. Иными словами

$$(F_k)_0 = -W'_m, \quad 9,$$

где

$$W'_m > W_m.$$

¹⁾ Ломоносов. Опытное исследование товарных паровозов компаунд нормального типа. Киев. 1907, стр. 264.

Лебедев. Опыты 1912—1913 гг. над сопротивлением пассажирских паровозов и вагонов Русской сети. СИБ. 1914, стр. 16—19.

ГЛАВА III.

Сопротивление поезда.

§ 18. Сопротивление от под'ема и от кривой. Как известно, сопротивление поезда складывается из двух частей, а именно, из сопротивления на прямом и горизонтальном пути и из сопротивления от под'ема и кривой.

Что касается сопротивления от под'ема, то оно в килограммах выражается совершенно точно теоретической формулой

$$(P + Q) i,$$

где P вес паровоза с тендером в тоннах, Q — вагонов, а i — величина под'ема в тысячных.

Правда, Барбье ¹⁾ предлагал оценивать сопротивление от под'ема формулой

$$0,9 i$$

но это предложение основано на недоразумении. Действительно, при движении на под'ем общее сопротивление поезда, как это было отмечено еще Петровым, меньше, чем

$$\frac{1}{2} w_0 + i,$$

а при движении под уклон больше

$$w_0 - i,$$

где w_0 удельное сопротивление поезда на прямом и горизонтальном пути; но эта разница обуславливается не тем, что сопротивление от под'ема меньше i , а тем, что на под'ем, благодаря

¹⁾ Revue Générale, 1897. I. S. стр. 278. Романов. Паровозы 1900, стр. 128.

²⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. 1889, стр. 233.

туго натянутым упряжным приборам, влияние вагонов меньше и потому та часть сопротивления, которая не зависит непосредственно от под'ема, меньше w_0 . На уклонах напротив, благодаря нажатым буферам, влияние увеличивается и сопротивление, не зависящее прямо от под'ема, делается больше чем на площадке.

С другой стороны формула Барбье

$$w_0 + 0,9 i$$

не может быть признана правильной и для огульной оценки сопротивления поезда на под'еме, без разделения на составные части: согласно ей уменьшение сопротивления w_0 от ослабления влияния

$$0,1 i$$

растет непрерывно с i и при крутых под'емах может сделаться больше w_0 , что уже полная нелепость.

По моим наблюдениям над указанным уменьшением w_0 , оно довольно хорошо укладывается в формулу

$$\frac{0,5}{1 + \frac{1}{i}}$$

иными словами полное сопротивление на под'еме выражается формулой

$$w_0 + i - \frac{0,5 i}{i + 1} = w_0 + i \left(1 - \frac{0,5}{i + 1} \right).$$

Поправка эта, однако, настолько незначительна, что обычно ее не делают.

Что же касается сопротивления поезда в кривых, то для него было предложено множество формул вида

$$(P + Q) k,$$

где k есть некоторая функция радиуса кривой R . Из этих формул простейшей является Брауншвейгская формула

$$k = \frac{760}{R},$$

где R выражено в метрах. Если же R выразить в саженьях, то вместо 760 мы должны написать 357; но так как наша колея несколько шире заграничной, то правильнее это число уменьшить

до 350, т. е. считать, что

$$k = \frac{350}{R_{\text{(сак)}}}.$$

формула эта, несмотря на свою простоту, дает по моим наблюдениям, особенно для товарных поездов, результаты не только не менее точные, чем более сложные формулы, но даже как будто более подходящие к действительности, чем они.

§ 19. Элементы сопротивления поезда на прямом и горизонтальном пути. Сопротивление поезда как ряда повозок, входящее в уравнение движения поезда

$$\frac{P+Q}{g} (1+\gamma) \frac{dV}{dt} = F_k - W_k,$$

состоит, как мы сказали, из сопротивления от под'ема и кривой, выражаемого формулой

$$(P+Q)(i+k)$$

и сопротивления поезда как ряда сцепленных повозок на прямом и горизонтальном пути. В свою очередь это последнее разбивается на сопротивление паровоза как повозки W_0' и сопротивление вагонов W_0'' . Таким образом,

$$W_0 = W_k + (P+Q)(i+k) = W_0' + W_0'' \quad . \quad . \quad . \quad 18$$

и

$$\frac{P+Q}{g} (1+\gamma) \frac{dV}{dt} = F_k - W_0' - W_0'' = (P+Q)(i+k).$$

Обычно W_0' считают пропорциональным весу паровоза с тендером, а W_0'' — вагонов, т. е. считают что

$$W_0' = w_0' P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19$$

и

$$W_0'' = w_0'' Q, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20$$

где w_0' называется удельным сопротивлением паровоза, как повозки, на прямом и горизонтальном пути, а w_0'' удельным сопротивлением вагонов на таком же пути.

Как W_0' так и W_0'' обуславливается одними и теми же причинами, а именно:

1. сопротивлением воздушной среды,
2. трением первого рода в шейках осей,
3. трением второго рода на ободах колес,

4. трением первого рода там же, вследствие влияния вагонов и
5. потерями живой силы на стыках и неровностях пути.

Поэтому как W'_0 так и W''_0 можно разложить на пять элементарных сопротивлений, которые мы и рассмотрим отдельно. При этом надо, однако, иметь в виду, что, так как поезд не есть твердое тело, а система их, то равнодействующая всех сил сопротивления, приложенных к паровозу или вагонам, не равна сумме их, а определяется из закона возможных перемещений, согласно коему

$$W'_0 ds = \sum W dx,$$

где W суть отдельные силы сопротивления, а dx их возможные перемещения; иными словами

$$W'_0 = \sum \frac{dx}{ds} W 21$$

§ 20. Сопротивление воздуха. Поезду со стороны воздуха приходится испытывать сопротивления двойного рода: во первых, ему приходится как бы проталкивать для себя в воздушной среде канал и бороться с вихревыми движениями между вагонами, а во вторых, между ним и воздухом развиваются силы трения. Равнодействующая этих последних сил, как это всегда имеет место при трении твердого тела о жидкое, пропорциональна смоченной поверхности и некоторой функции $\varphi_1(V)$. Смоченная поверхность паровоза и тендера зависит от их конструкции, а вагонов, кроме того, пропорциональна их числу.

Что же касается лобового сопротивления паровоза, то оно, как известно, выражается формулой вида

$$a' \Omega' V^2,$$

где a' опытный коэффициент, а Ω' лобовая поверхность паровоза. Точно также и для каждого вагона сопротивление от захлестывания воздуха по опытам Франка¹⁾ выражается формулой вида

$$a'' \Omega'' V^2$$

где a'' значительно меньше a' .

Поэтому полное сопротивление воздуха для паровоза и тендера имеет вид

$$W_1 = a' \Omega' V^2 + S' \varphi_1(V) 22$$

¹⁾ Organ. 1899. Стр. 147—148.

где S' смоченная их поверхность. Для вагонов же, если число их равно n , мы имеем

$$W_1'' = n \left[a'' Q' V^2 + S'' \varphi_1(V) \right] \quad 23$$

Возможное перемещение этих сил совпадает с возможным перемещением центра тяжести поезда и потому для них поправки

$$\frac{dx}{ds} = 1.$$

Что касается функции $\varphi_1(V)$, то по теоретическим соображениям Петрова¹⁾ она содержит только член с первой степенью скорости; по Франку²⁾ же все сопротивление воздуха пропорционально квадрату скорости. Судя по опытам самого Франка, Госса³⁾ и Эйфеля⁴⁾, прав Франк, а не Петров. Поэтому окончательно можно считать, что

$$W_1' = A_1' V^2 \quad 22a$$

и

$$W_1'' = n A_1''' V^2, \quad 23a$$

где A_1' и A_1''' суть постоянные, подлежащие определению экспериментальным путем.

Сейчас, однако, нам гораздо важнее отметить, во первых, то обстоятельство, что благодаря влиянию члена $a' Q' V^2$, удельное сопротивление воздуха для паровоза значительно больше, чем для вагонов, а во вторых, что сопротивление воздуха для вагонов пропорционально их числу. Первое замечание, однако, верно только до тех пор, пока паровоз идет в голове поезда, при движении же вагонами вперед лобовое сопротивление называется приложенным к первому вагону.

§ 21. Сопротивление в шейках. Сила трения в каждой шейке равна очевидно

$$\varphi R,$$

где R нагрузка на шейку, а φ коэффициент трения. Сопротивление же, вызываемое каждой такой силой, равно

$$\frac{dx}{ds} = \varphi R.$$

¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. 1889, стр. 48.

²⁾ Zeitschrift des V. D. I. 1906. Стр. 593.

³⁾ Railroad Gazette. 1898. Стр. 357.

⁴⁾ Revue de Mecanique. 1907. Стр. 574.

причем

$$\frac{dx}{ds} = \frac{\partial}{D},$$

где ∂ диаметр шейки, а D — колеса. Полное же сопротивление этого рода для паровоза

$$W'_1 = \varphi \sum \frac{\partial'}{D'} R',$$

а для вагонов

$$W'_2 = \varphi \sum \frac{\partial''}{D''} R'' = n \varphi x \frac{\partial''}{D''} R'',$$

где x число осей в одном вагоне.

Формулы эти показывают, что, вообще говоря, W_2 падает с увеличением диаметра колес, и потому для пассажирских паровозов

$$w'_2 = \frac{W'_2}{P}$$

не только всегда меньше, чем для товарных, но может быть даже меньше, чем соответственное удельное сопротивление вагонов.

Так как шейки всегда обильно смазываются, то, согласно гидродинамической теории трения Петрова, опытам Рейнольдса и новейшим работам в этой области¹⁾, φ следует считать пропорциональным скорости на окружности шейки

$$v = \frac{\partial}{D} V,$$

т. е. считать, что

$$\varphi = \beta \frac{\partial}{D} V.$$

С другой стороны для каждой оси

$$R = H - p,$$

где H нагрузка на рельс, а p вес колеса и $1/2$ оси. Поэтому для вагонов

$$n x R'' = Q - n x p,$$

где

$$Q = n x H$$

¹⁾ Вестник Общ. Технологов. 1914. Стр. 29—30.

Что же касается коэффициента n , то по опытам Рейнольдса ¹⁾ он не зависит от скорости, а определяется исключительно соотношением между упругими свойствами катящегося предмета и опоры, т. е. в нашем случае колеса и рельса. Поэтому можно написать, что

[illegible]

И

[illegible]

причем вообще говоря

$$C'_3 < C''_3,$$

§ 23. **Сопротивление от виляния.** Силы трения первого рода, развивающиеся на ободе колес при вилянии подвижного состава пропорциональны, очевидно, нагрузкам P , коэффициенту трения первого рода φ и тем боковым импульсам, которые вызывают виляние. Иными словами сопротивление поступательному движению колеса, вызываемое его боковыми перемещениями, равно

e q II.

где e есть коэффициент, характеризующий указанные боковые импульсы, и вызываемые ими перемещения колеса относительно рельса.

Поэтому для паровоза

[illegible]

а для вагонов

[illegible]

С этим согласны и Петров²⁾ и Франк³⁾, подвергавшие этот вопрос теоретическому исследованию. Дальнейшие же их рассуждения по отношению к вагонам не одинаковы: по мнению Петрова, так как опыты Вебера установили, что влияние вагонов увеличивается вместе со скоростью, то формулу (29) надо исправить прибавкой для каждого вагона члена aV , а для всех, значит, naV ; иными словами, по его мнению

$$W_n'' = \exp(Q + naV).$$

Франк же, исходя из того же положения, считает, что

$$e = \beta V^2,$$

¹⁾ Радциг. Прикладная механика. Стр. 29.

²⁴⁾ Петров. Сопротивление поездов на ж. д. Стр. 117 -119.

³⁾ Zeitschrift der V. D. I. 1903. Стр. 460.

откуда

$$W'_4 = \varphi \beta V^2 Q.$$

Нельзя не признать, что вывод Франка логически правильное Петрова, однако, по существу к истине ближе Петров. В самом деле чем легче вагон, тем более свободно совершается его влиание, ибо ограничивающее его трение колес о рельсы будет менее, поэтому правильное считать, что

$$e\varphi'' = a'' + \frac{b''}{q}, \quad (*)$$

где a'' и b'' суть некоторые функции скорости, а

$$q = \frac{Q}{n} \quad 30$$

есть вес одного вагона. Принимая же для $e\varphi''$ выражение (*) мы имеем

$$W'_4 = a'' Q + b n'',$$

как это получается и по формуле Петрова. Иными словами есть основания считать, что сопротивление вагонов от влиания состоит из двух частей, из коих одна пропорциональна весу вагонов, а другая числу их.

Что же касается вида функции a и b то существуют некоторые, но достаточно шаткие теоретические основания считать их линейными. Правильнее же сказать, что вида их мы не знаем, но для наших довольно грубых вычислений признаем, что их можно заменить параболическими зависимостями

$$AV^2 + BV + C,$$

т. е. считать, что

$$W'_4 = (A''_1 V^2 + B''_1 V + C''_1) Q + (A''_2 V^2 + B''_2 V + C''_2) n \quad . . . 29a$$

Возвращаясь к сопротивлению вследствие влиания паровоза и тендера необходимо отметить, что там это явление осложнено силами инерции, растущими с квадратом скорости, и потому в этом случае еще с большим правом можно считать, что

$$e' \varphi' = w'_4 = A'_1 V^2 + B'_1 V + C_1 \quad 28a$$

§ 24. Сопротивление от ударов на стыках. Сущность этого сопротивления состоит в том, что на каждом стыке и на

каждом вообще „толчке“ пути теряется некоторая часть живой силы поезда

$$\beta T$$

килограммометров. Этот эффект в смысле сопротивления движению эквивалентен тому, если бы к поезду была приложена сила W_3 , определяемая из равенства

$$W_3 l = \beta T,$$

где l есть расстояние между толчками.

Живая сила паровоза и тендера

$$T' = \frac{V^2}{2} \left(\frac{P}{g} + \sum \frac{I'}{R'^2} \right) = \frac{PV^2}{2g} (1 + \gamma),$$

откуда

$$W_3' = \frac{\beta T'}{l} = \frac{(1 + \gamma) \beta}{2lg} V^2 P, \quad 31$$

или

$$W_3' = A_3' V^2 P \quad 31a$$

Живая же сила вагонов

$$T'' = \frac{V^2}{2g} \left(Q + g n \frac{I''}{R''^2} \right)$$

откуда

$$W_3'' = \frac{\beta V^2}{2gl} \left(Q + g n \frac{I}{R^2} \right), \quad 32$$

или

$$W_3'' = A_3'' V^2 Q + A_3''' V^2 n \quad 32a$$

§ 25. Общие соображения о сопротивлении паровозов и вагонов на прямом и горизонтальном пути. Теоретические соображения, приведенные в предыдущих §§, показывают нам во первых, что сопротивление паровозов и вагонов зависит от скорости, причем эта последняя должна входить в выражения для W_0' и W_0'' как в первой так и во второй степени. Это вытекает непосредственно из формул

$$W_0' = \Sigma W' = A_1' V^2 + (A' V^2 + B' V + C') P \quad 33$$

и

$$W_0'' = \Sigma W'' = (A'' V^2 + B'' V + C'') Q + (A''' V^2 + B''' V + C''') n, \quad . . . 34$$

где

$$\left. \begin{aligned} A' &= A'_1 + A'_5. \\ B' &= B'_2 + B'_4 \\ C' &= C'_2 + C'_3 + C'_4 \\ A'' &= A''_1 + A''_5 \\ B'' &= B''_2 + B''_4 \\ C'' &= C''_2 + C''_3 + C''_4 \\ A''' &= A'''_1 + A'''_4 + A'''_5 \\ B''' &= B'''_2 + B'''_4 \\ C''' &= C'''_2 + C'''_4 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (35)$$

Что же касается численных значений этих коэффициентов, то определить их теоретически удалось пока далеко не все. Поэтому для получения надежных их значений остается один путь — путь научно обставленных опытов. При этом для наших целей, т. е. для тяговых расчетов, совершенно безразличны значения коэффициентов, входящих в правую часть формул 35; для нас интересны только значения суммовых коэффициентов, стоящих в левой части. Для определения их еще со времен Стефенсона был произведен целый ряд опытов; но прежде чем привести их результаты, сделаем на основании теоретических соображений предыдущих §§ еще ряд выводов, имеющих для нас большое практическое значение.

Прежде всего отметим, что, согласно сказанному выше, значения отдельных коэффициентов в наших основных формулах в значительной степени зависят от типа и размеров подвижного состава, как, например, диаметра колес, числа осей, смачиваемой воздухом поверхности и т. п. Поэтому можно наперед сказать, что общей формулы для сопротивления подвижного состава быть не может, и что формулы, выведенные при опытах над одним типом подвижного состава, вообще говоря, нельзя применять к другим.

Затем напомним, что, как это было отмечено в § 20, сопротивление воздуха для паровоза, идущего в голове поезда, значительно больше, чем для вагонов. С другой стороны сопротивление в шейках, перекатыванию и отчасти на стыках падает с увеличением диаметра колес, и потому для паровозов и в особенности для пассажирских эти сопротивления на тонну веса всегда меньше, чем для вагонов. В итоге вследствие этих причин и все удельное сопротивление паровоза с тендером, как повозки, может оказаться меньше удельного сопротивления

вагонов. Иное дело, полное сопротивление паровоза на тонну веса

$$w'_0 + \frac{W^m}{P}:$$

оно всегда больше W''_0 .

Но во всяком случае, можно сказать, что удельное сопротивление вагонов и паровозов не равно. Поэтому надлежит признать, что все те формулы для удельного сопротивления, которые обнимают и сопротивление паровоза и сопротивление вагонов и не содержат в себе числа их теоретически неправильны. Из числа таких формул, в основу которых положена гипотеза

$$w'_0 = w''_0$$

наибольшим распространением пользуются в Европе формула германских инженеров

$$w_0 = 2,4 + \frac{V^2}{1000},$$

а в Америке формула завода Балдвина

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}.$$

Вопрос о том, в какой мере ими допустимо пользоваться на практике будет рассмотрен ниже.

§ 26. Формулы для сопротивления двухосных вагонов. Первые опыты над сопротивлением вагонов были произведены Стефенсоном и Уудом в 1818 г., и затем на протяжении почти столетия вопрос этот привлекал внимание целого ряда исследователей. Большинство их работ, однако, теперь имеет только историческое значение, ибо как было только что указано сопротивление всякого рода железнодорожных повозок в значительной мере зависит от их устройства, а это последнее подвергалось непрерывным изменениям. Поэтому для наших чисто практических целей имеют значения только формулы, выведенные из опытов над современными типами вагонов.

Из числа таких формул относящихся к двухосным крытым вагонам наибольшим распространением пользуются формулы Петрова ¹⁾, Франка ²⁾, Барбье ³⁾ и Надаля ⁴⁾. Формулы эти можно

¹⁾ Мухачев. Теория и конструкция паровозов. 1895. Стр. 57.

²⁾ Zeitschrift des V. D. I. 1907. Стр. 25.

³⁾ Revue Générale. 1897. I. S., стр. 283.

⁴⁾ Nadal Locomotives à vapeur. 1908. Стр. 282.

разбить на две категории: по одним сопротивление вагонов зависит только от скорости, а по другим, кроме того, и от числа вагонов в поезде, или что тоже от средней их нагрузки. К первой категории, теоретически неправильно, относятся формулы Барбье

$$w_0'' = 1,6 - 0,46 V \cdot \frac{V + 50}{1000}$$

и Надаля

$$w_0'' = 1,6 + 0,3 V \cdot \frac{V + 90}{1000}$$

а ко второй Петрова

$$W_0'' = 1,2 Q + 0,9 n V + 0,03 (1 + 0,04 n) V^2$$

и Франка

$$W_0'' = 2,5 Q + 0,0142 \left(\frac{V}{10} \right)^2 Q + 0,3 n \left(\frac{V}{10} \right)^2,$$

которые можно представить также под видом

$$W_0'' = a Q + b n + c,$$

где n — число вагонов в поезде, а a , b и c некоторые функции скорости. Так как средняя нагрузка вагона брутто

$$q = \frac{Q}{n},$$

то формулы эти можно представить под видом

$$W_0'' = a Q + \frac{Q}{q} b + c,$$

или под видом

$$w_0'' = a + \frac{b}{q} + \frac{c}{Q}.$$

Такое преобразование приводит формулу Петрова к виду

$$w_0'' = 1,2 + \frac{0,9 V}{q} + \frac{0,0012 V^2}{q} + \frac{0,03 V^2}{Q},$$

а формулу Франка к виду

$$w_0'' = 2,5 + \left(0,0142 + \frac{0,3}{q} \right) \left(\frac{V}{10} \right)^2.$$

В первой из них, кроме того, можно пренебречь последним членом, вследствие его крайней малости; тогда обе эти формулы

получат вид

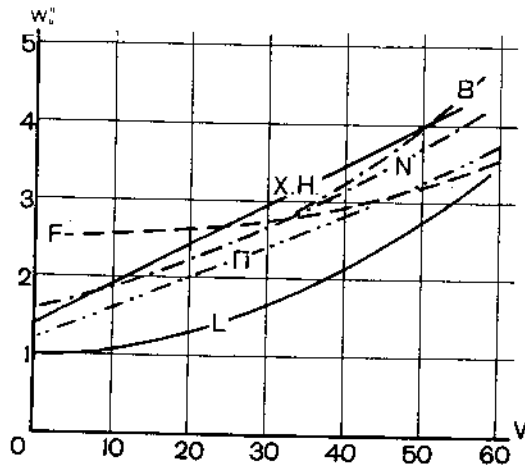
$$w_0'' = a + \frac{b}{q}$$

или

$$W_0'' = w_0'' Q = aQ + bn, \quad 36$$

как это и принимает в своих расчетах большинство русских дорог.

К этой же категории надо отнести и формулы, у которых коэффициенты меняются в зависимости от того, имеем ли мы



Фиг. 22. Крытые вагоны, груженные 1000 пуд.

дело с грузными или порожними вагонами. Сюда относятся формулы X.-Н. ж. д., дающие для грузных вагонов

$$w_0'' = 1,4 + \frac{\Gamma}{18}$$

и для порожних

$$w_0'' = 1,4 + \frac{\Gamma}{12}$$

а также новейшие формулы Лейтцмана ¹⁾: для грузных

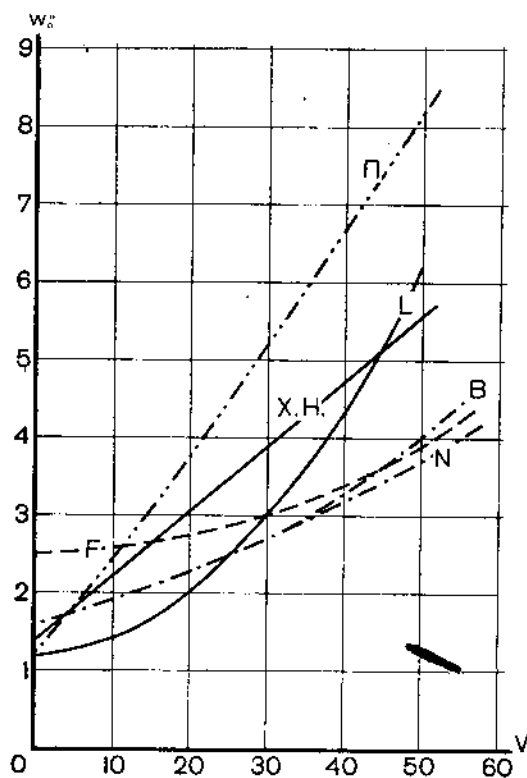
$$w_0'' = 1,0 + \frac{\Gamma^2}{1455}$$

и для порожних

$$w_0'' = 1,2 + \frac{\Gamma^2}{500}$$

¹⁾ Leitzmann und von Borries, Theoretisches Lehrbuch des Lokomotivbaues 19 . Стр. 341.

Для того, чтобы отдать себе отчет, насколько все эти формулы дают согласные результаты, на фиг. 22—23 они сопоставлены между собой; на первой для вагонов нагруженных 1000 пудами, а на второй для порожних. Из этих фигур мы видим, что для груженных вагонов формулы Петрова (П), Барбье (В), Надаля (N) и X.-Н. ж. д. (X. Н.) дают более или менее тождественные значения w_0'' , в то время как по формуле Лейтзмана они получаются много меньше. Что же касается формулы Фран-



Фиг. 23. Порожние крытые вагоны.

ка, то на фиг. 22—23 кривые ее пересекают все остальные. Это заставляет сомневаться в правильности ее структуры, а именно дает основание думать, что в ней свободный от скорости член 2,5 преувеличен, а влияние скорости недооценено. В пользу такого предположения говорит и тот общеизвестный факт, что на 2 тысячном уклоне товарный вагон, выведенный из состояния покоя сам не останавливается, а продолжает катиться со скоростью около десяти верст в час.

Что же касается порожних вагонов, то для них, как показывает фиг. 23, указанные формулы расходятся между собой гораздо

больше, причем из всех формул, зависящих прямо или косвенно от q , наибольшие значения для сопротивления порожняка дает формула Петрова (П), а наименьшие Франка (F). Кроме того, сопоставляя результаты, которые дают эти формулы для грузовых и порожних вагонов, мы видим, что в то время как при $V = 50$ увеличение сопротивления порожняка составляет по Франку 22% , по Петрову оно достигает 153% .

Такое противоречие в оценке влияния q на w_0'' требует обстоятельного выяснения. Иначе при тяговых расчетах мы рискуем впасть в серьезные ошибки. Необходимо, кроме того выяснить и еще один вопрос, вытекающий из самого вида приведенных выше формул, а именно можно ли в формулах для w_0'' пренебрегать членом с квадратом скорости, как это имеет место в формуле Х.-Н. ж. д., или членом с первой степенью скорости, как это делают Франк и Лейтцман. Этими вопросами мы сейчас и займемся.

§ 27. Влияние нагрузки двухосных вагонов на их сопротивление. Достаточно раз проехать по любому участку с двумя поездами одинакового веса, но составленными один из порожних, а другой из полногрузных вагонов, чтобы убедиться что удельное сопротивление порожнего вагона больше полногрузного, иными словами, что

$$W_0'' = \left(a + \frac{b}{q}\right) Q = aQ + bm \dots \dots \dots 36$$

Что же касается относительного значения последнего члена, то оно оценивается разными исследователями весьма различно. По опытам Саксонских дорог¹⁾, все те сопротивления поезда, которые зависят от скорости, пропорциональны и числу вагонов или осей. Исходя из этих опытов, проф. Петров в своей формуле

$$w_n = 1,2 + \frac{0,9 \Gamma}{q} + \frac{0,0012 V^2}{q}$$

полагает, что a вовсе не зависит от скорости, а b , напротив, не содержит члена, не зависящего от скорости. Напротив Франк, на основании своих опытов и теоретических соображений, утверждает²⁾, что часть сопротивления, зависящего от скорости, вовсе не зависит от числа вагонов или от средней нагрузки. Это очевидно и из его формулы

$$w_n = 2,5 + \left(0,0142 + \frac{0,3}{q}\right) \left(\frac{V}{10}\right)^2.$$

¹⁾ Мухачев. Теория и конструкция паровоза. 1895, стр. 41--47.

²⁾ Zeitschrift der V. D. I. 1903, стр. 460.

Для того, чтобы разобраться в этом вопросе, попробуем, во-первых, осветить его теоретически, а во-вторых, используем для этой цели данные динамометрических наблюдений, производившихся под моим руководством на четырех дорогах (Х.-Н., Ек., Ташк. и Ник.).

Как было указано, сопротивление вагонов складывается из 5 частей:

1. сопротивления воздушной среды,
2. трения в шейках осей,
3. трения второго рода на ободе колеса,
4. трения первого рода там же, вследствие влияния вагонов и
5. потерь живой силы на стыках и неровностях пути.

Сопротивление воздуха мы приняли все пропорциональным числу вагонов, т. е. мы приняли, что

$$W_1'' = b_1 n,$$

где b_1 есть функция скорости. Трение в шейках напротив, как мы видели, падает с увеличением числа вагонов по закону

$$W_2'' = a_2 Q - b_2 n,$$

чего в своих теоретических исследованиях не учитывали ни Франк, ни Петров. Сопротивление перекачиванию вовсе не зависит от n и выражается формулой вида

$$W_3'' = a_3 Q.$$

Сопротивление от влияния мы признали только отчасти зависящим от n , т. е. выражающимся формулой

$$W_4'' = a_4 Q + b_4 n,$$

в то время как Франк считает $b_4 = 0$, а Петров, в конце концов, принимал $a_4 = 0$. Сопротивление от ударов бесспорно выражается формулой

$$W_5'' = a_5 Q + b_5 n,$$

ибо живая сила вагонов

$$T'' = \frac{V^2}{2g} \left(Q + gx \frac{I''}{R^2} n \right),$$

причем второй член этого выражения составляет от 4 до 12% первого. Тем не менее Франк считает $b_5 = 0$, а Петров, полагая сперва

$$W_5'' = a_5 Q + b_5 n,$$

в окончательном своем выводе пренебрегает величиной a_3 , т. е. считает все сопротивление от ударов пропорциональным числу вагонов. В этом и состоит его ошибка, благодаря которой в его формуле влияние n или точнее q значительно переоценено.

Резюмируя сказанное, мы видим, что числу вагонов теоретически должно быть пропорционально все сопротивление воздуха, часть сопротивления от вилияния и от ударов и, кроме того в этот же член входит отрицательная поправка от трения в шейках. По мнению же Франка, член bn обнимает собой только сопротивление воздуха, а по мнению Петрова, все сопротивление от вилияния и ударов. Естественно поэтому ожидать, что в смысле оценки влияния числа осей на сопротивление поезда истина лежит где-то посреди между Франком и Петровым. И действительно, динамометрические наблюдения, производившиеся мной на разных дорогах, вполне подтверждают это предположение.

Наиболее интересная часть этих наблюдений была произведена летом и осенью 1899—1900 гг. на Харьковско-Николаевской дороге. Опыты производились, как с порожними, так и с грузовыми вагонами, причем средний вес этих последних вместе с тарой был около 1090 пуд. $\approx$ 18 тонн. Для подсчета сопротивления мы брали только такие наблюдения, которые имели место при вполне установившейся скорости и на таких точках профиля, когда весь поезд располагался на однородном подъеме. При таких условиях

$$W_0'' = F_n \cdot (i + k) Q,$$

где F_n сила тяги на крюке первого вагона, измерявшаяся динамометром Теодоровича.

Результаты этих опытов в виде точек, дающих величину

$$w_0'' = \frac{W_0''}{Q},$$

приведены на фиг. 24—25; на первой для грузовых ($q = 18$), а на второй для порожних вагонов.

Всматриваясь в фиг. 24, мы видим, что для скорости от 8 до 55 км/ч главная масса точек располагается между параболой

$$w_0'' = 1,4 + \frac{v}{20} + \frac{v^2}{4000} \quad \dots \quad \Pi$$

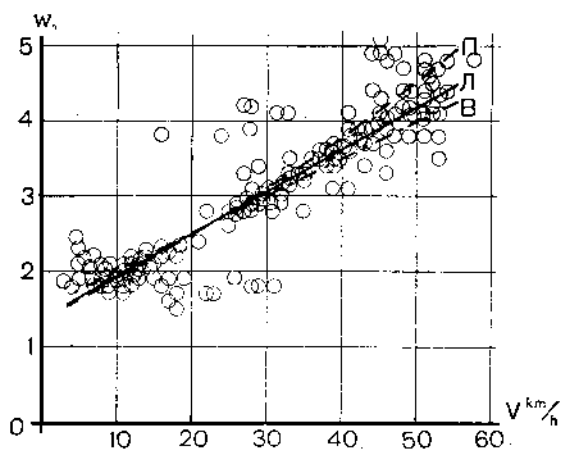
изображенной мелким пунктиром, и прямой

$$w_0'' = 1,5 + \frac{v}{20}, \quad \dots \quad \text{В}$$

представляющей из себя не что иное, как формулу Балдвина, по которой в Америке определяют сопротивление [всего поезда¹⁾]. Таким образом, обе эти формулы можно признать оправданными опытами над русскими вагонами и при русских условиях. Но еще лучше отвечает этим обстоятельствам силовная прямая, имеющая уравнение

$$w_0'' = 1,4 + \frac{V}{18} \dots \dots \dots \text{Л}$$

Теоретически формула эта неправильна, ибо у ней нет члена с



Фиг. 24. Х.-Н. ж. д.

квадратом скорости, но практически это ее большое преимущество.

Переходим теперь к сопротивлению порожних вагонов, т. е. к фиг. 25.

На ней ясно выражены два пучка точек — верхний и нижний; первый состоит почти исключительно из точек, полученных в августе — ноябре на Николаевском участке (они залиты тушью накрест); а второй — из полученных летом на разных участках Х.-Н. ж. д. Точкам первого пучка удовлетворяет прямая

$$w_0' = 1,4 + \frac{V}{8} \dots \dots \dots \text{К}$$

приведенная в книге Чечотта²⁾, или еще лучше пунктирная параболла

¹⁾ Railroad Gazette. 1897. Стр. 348.

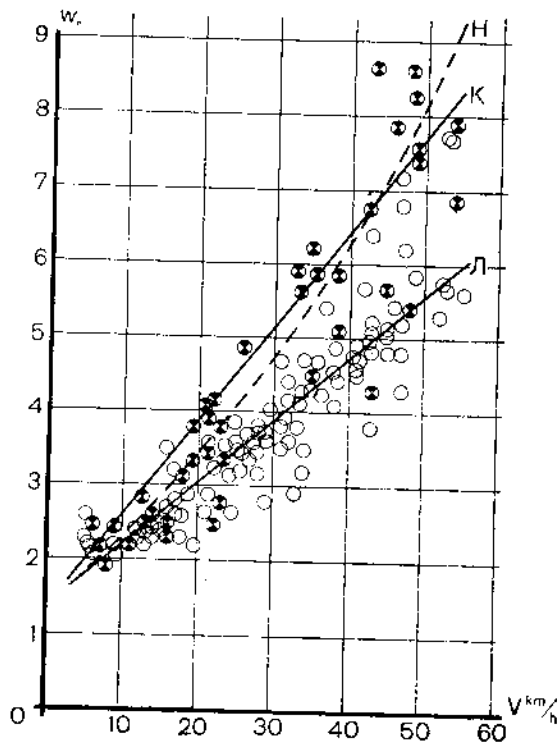
²⁾ Чечотт. Новый метод расчета времен перегонов. 1910, стр. 17.

$$w'_0 = 1,4 + \frac{V}{12} + \frac{V^2}{1000} \dots \dots \dots \text{Н}$$

точки же второго пучка лучше всего укладываются в прямую

$$w'_0 = 1,4 + \frac{V}{12} \dots \dots \dots \text{Л}$$

Первоначально, до производства наблюдений на других дорогах,



Фиг. 25. X-Н. ж. д.

я из осторожности рекомендовал первую из этих формул¹⁾; однако, динамометрические наблюдения на Екатерининской, Ташкентской и Николаевской жж. дд. привели меня к заключению, что даже в пустынях Средней Азии формула

$$w'_0 = 1,4 + \frac{V}{8}$$

¹⁾ Записки студентов по курсу эксплуатации жж. дд., читанному в Киевском Политехническом Институте проф. Ю. В. Ломоносовым. Литографированное изд. 1903/4 г., стр. 66.

дает верные результаты лишь при осенних ветрах; в средней же России едва ли могут быть такие условия, при которых сопротивление ~~порожних~~ вагонов превышало продолжительное время

$$w'_0 = 1,4 + \frac{V}{12};$$

исключения составляют лишь бури и мятели, т. е. обстоятельства исключительные, не характерные для величины w''_0 .

Формулы

$$w''_0 = 1,4 + \frac{V}{18}$$

для груженных и

$$w''_0 = 1,4 + \frac{V}{12}$$

для порожних вагонов укладываются в одну общую формулу

$$w''_0 = 1,4 + \left(0,04 + \frac{0,32}{q}\right) V,$$

если q выражено в тоннах, или в

$$w''_0 = 1,4 + \left(0,04 + \frac{20}{q}\right) V,$$

если q выражено в пудах, или наконец в

$$W''_0 = \left(1,4 - \frac{V}{25}\right) Q + 0,32 n V,$$

если мы предпочитаем иметь дело не с q , а с n .

Формула эта называется обычно формулой Х. - Н. ж. д. Надо, однако, отметить, что она вполне подтвердилась как при моих опытах на Ек. и Ник. ж. д., так и при опытах Липца на Ташк. ж. д. По своей природе она занимает среднее место между формулами Петрова и Франка: с одной стороны она имеет член, зависящий от скорости, и не содержащий в себе числа вагонов, а с другой, член, пропорциональный этому последнему, у нее больше, чем у Франка и чем это могло бы иметь место вообще, если бы этот член оценивал только сопротивление воздуха.

§ 28. Влияние скорости на сопротивление двухосных вагонов. Как было указано в § 24, сопротивление вследствие ударов на стыках пропорционально квадрату скорости. Этого никто не оспаривал. Почти также бесспорно и то, что сопротив-

ление вследствие трения в шейках выражается линейною функциею от скорости. Таким образом, тот факт, что формулы для w_0 должны содержать и член со скоростью в первой степени и в квадрате, может считаться установленным, независимо от тех споров, которые могут вестись относительно сопротивления воздуха и трения от вилания. Поэтому надлежит признать, что формулы Х.-Н. ж. д. с одной и Франка и Лейтцмана с другой стороны теоретически неправильны.

Между тем фиг. 22—25 показывают нам, что и очертание кривых, построенных по формулам, содержащим и V и V^2 и опытные точки по крайней мере для скоростей до 50 km/h гораздо ближе подходят к линейной формуле Х.-Н. ж. д. чем к параболам Франка или Лейтцмана. Это объясняется тем, что, когда вагоны идут за паровозом, влияние члена с V^2 на общую величину w_0 при малых скоростях гораздо меньше влияния члена с V . Так, например, из таблицы VII, где приведены значения отдельных членов формулы Петрова для вагонов груженных 1000 пудами, видно, что по этой формуле для скоростей от 10 до 50 km/h из всей той части сопротивления, которое зависит от скорости, только от 1—6% пропорциональны квадрату ее. Поэтому пренебрежение для этих условий членом с V^2 вносит гораздо меньшую ошибку, чем пренебрежение членом с V в

Т а б л и ц а VII.

Скорость V km/h	10	20	30	40	50
Значение $0,9 \Gamma = a$	0,39	0,77	0,16	1,54	1,93
Значение $0,12 \left(\frac{V}{10} \right)^2 - \beta$	0,005	0,02	0,05	0,08	0,13
Сумма $a + \beta$	0,40	0,79	1,21	1,62	2,06
Отношение $\frac{\beta}{a + \beta}$	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06

первой степени. Более того фиг. 22—24 дают право сказать, что линейные формулы для товарного движения могут дать результаты достаточно точные для задач повседневной практики.

Чтобы закончить вопрос о влиянии скорости на w_0 , отметим, что, судя по расположению точек на фигурах 24 и 25, сопротивление вагонов не только не уменьшается с уменьшением скорости ниже 10 km/h, но как будто даже возрастает. Это

явление было указано еще Петровым¹⁾, подтверждено Уиллингтоном²⁾, Деннисом³⁾ и известно всякому, кто имел дело с ручными маневрами вагонов. Теоретически же это явление недостаточно обосновано.

§ 29. Сравнительная оценка формул для двухосных вагонов. Выше мы нашли, что формулы Франка и Лейтцмана теоретически неправильны, ибо они не содержат члена с первой степенью скорости. Правда, Лейтцман предлагает и трехчленные формулы сопротивления⁴⁾, а именно для грузовых вагонов:

$$w_0'' = 0,7 + \frac{V}{40} + \frac{V^2}{3200}$$

и для порожних

$$w_0'' = 0,9 + \frac{V}{25} + \frac{V^2}{890},$$

но они также, как и его двухчленные формулы, дают явно преуменьшенные результаты. Формула же Франка, кроме своей теоретической неправильности, еще недооценивает влияние на грузки вагонов на их сопротивление. Напротив, формула Петрова переоценивает это влияние и, давая очень хорошие результаты для грузовых вагонов, едва ли может быть рекомендована для порожних.

Остаются таким образом формулы Барбье

$$w_0'' = 1,6 + 0,46 V \frac{V+50}{1000};$$

Надаля

$$w_0'' = 1,6 + 0,3 V \frac{V+90}{1000}$$

и Харьковско-Николаевской ж. д.

$$w_0'' = 1,4 + (0,04 + \frac{20}{q}) V^2.$$

Но первые две формулы не содержат в себе q , влияние которого, как мы видели, довольно значительно, и которое в товарной

¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. 1889, стр. 351.

²⁾ Wellington. The Economic Theory of the Location of Railway. VI изд. 1901, стр. 518.

³⁾ Railroad Gazette. 1902, стр. 924.

⁴⁾ Leitzmann und v. Borries. Theoretisches Lehrbuch des Lokomotivbaues. 1911, стр. 341.

⁵⁾ q в пудах.

службе колеблется в весьма широких пределах. Поэтому для товарных вагонов я беру на себя смелость рекомендовать формулу Х.-Н. ж. д., обладающую помимо всего прочего тем неоспоримым достоинством, что она выведена из опытов над русскими товарными вагонами и в русских условиях их службы.

Что же касается двухосных и трехосных пассажирских вагонов, то для них можно рекомендовать формулы Барбье и Надаля, которые и получены при опытах с пассажирскими двухосными вагонами. Этим и объясняется, почему они не содержат в себе q , которое для пассажирских вагонов колеблется в гораздо меньших пределах, чем для товарных.

§ 30. **Формулы для сопротивления вагонов на тележках.** Из числа формул, предложенных для определения сопротивления пассажирских вагонов на тележках, наибольшим распространением пользуются формулы Барбье ¹⁾

$$w_0'' = 1,6 + 0,456 V \sqrt{\frac{V + 10}{1000}},$$

Надаля ²⁾

$$w_0'' = 1,4 + 0,2 V \sqrt{\frac{V + 80}{1000}},$$

и Франка ³⁾

$$w_0'' = 2,5 + 0,03 \left(\frac{V}{10} \right)^2.$$

Все эти формулы не содержат в себе q и дают при одинаковых скоростях значения w_0'' меньшие, чем формулы тех же авторов для двухосных вагонов. Первое обстоятельство ни в коем случае не может быть поставлено им в минус, ибо колебание веса 4-осного пассажирского вагона в зависимости от числа едущих пассажиров еще меньше, чем двухосного. Даже для наших вагонов III класса, весящих 2200 пуд. и вмещающих 54 пассажира, колебание веса, считая 5 пудов на человека, не превосходит 12%, для вагонов же I класса это колебание составляет всего 3%.

Кроме этих формул, заслуживают внимания результаты опытов Коля (Cole) на Индийских ⁴⁾ и завода Балдвина на американских дорогах ¹⁾. Результаты эти выражены не в виде формул, а в виде кривых, приведенных на фиг. 27 (стр. 77).

¹⁾ Revue Générale. 1897, I S., стр. 283.

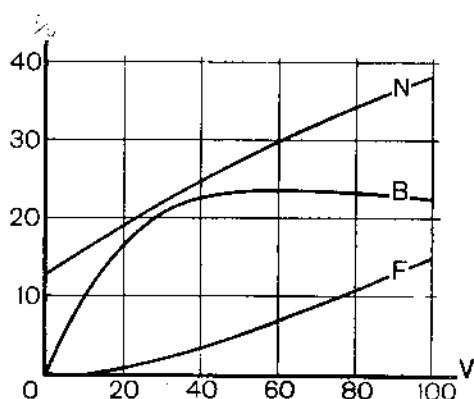
²⁾ Nadal. Locomotives à vapeur. 1908, стр. 282.

³⁾ Zeitschrift des V. D. I. 1907, стр. 95.

⁴⁾ The Engineer. 1913. I., стр. 463.

Что же касается того обстоятельства, что удельное сопротивление восьмиколесных вагонов по всем формулам оказывается меньше, чем четырехколесных, то это объясняется с одной стороны уменьшением сопротивления воздуха вследствие уменьшения числа лобовых стенок, а с другой уменьшением влияния вагонов с увеличением их базы. Нужно, однако, отметить, что рассматриваемое уменьшение w_0'' оценивается указанными формулами далеко неодинаково. Это лучше всего видно из фиг. 26, где по оси ординат отложены значения этого уменьшения в $\frac{w_0''}{w_0}$.

Такая расхожимость подрывает доверие ко всем этим формулам, хотя во время опытов над типами пассажирских паровозов



Фиг. 26.

вазов выяснилось с достаточной очевидностью, что при скоростях от 50 до 100 км/ч формула Надаля дает летом результаты очень близкие к действительности; зимой же напротив лучшие результаты дает формула Барбье. Поэтому для получения надежных данных о сопротивлении восьмиколесных пассажирских вагонов русских дорог был подвергнут специальной обработке весь обширный динамометрический материал, собранный во время опытов с пассажирскими паровозами. Работа эта для летних поездок (июнь—август) была исполнена Любимовым и Дадаевым, предложившими формулу

$$w_0'' = 1,2 + 0,3 \sqrt{\frac{V + 33}{1000}},$$

а для зимних поездок (ноябрь—декабрь) Лебедевым, остановившимся на формуле

$$w_0'' = 1,5 + 0,5 V \frac{V+10}{1000}.$$

Надо, однако, иметь в виду, что формула Любимова и Дадаева, как выведенная для особо благоприятных условий погоды не сравнима с формулами Надаля и Барбье, относящимися к средним условиям, и по этой причине требует особой осторожности при своем применении. Кроме того, можно думать, что на опытах состояние вагонов было выше среднего. Все это заставляет предполагать, что для средних русских условий более разумнее пользоваться формулой

$$w_0'' = 1,4 + \frac{V^2}{50} + \frac{V^2}{5000} = 1,4 + 0,2 V \frac{V+100}{1000},$$

предлагаемой автором. В пользу этой формулы говорит во-первых то, что, как видно из фиг. 27, она (А) очень близко подходит к кривой Коля (С), а во-вторых то, что при больших скоростях она сливается с формулой Франка (F), оправданной для этих условий очень тщательными опытами²⁾.

Из этой фигуры видно также, что формула Лебедева (Л) очень близка к формуле Барбье (В), а формула Любимова и Дадаева (Л. Д.) — к формуле Надаля (N), как этого и следовало ожидать после сказанного в начале этой страницы. Кроме того, эта фигура показывает, что при малых скоростях формула Франка дает неправдоподобно большие результаты.

Что касается товарных вагонов на тележках, то наибольшего доверия в этом случае заслуживают опыты проф. Шмидта³⁾ на Американских дорогах; они укладываются в формулу

$$w_0'' = \frac{V+65}{12+0,55 V}.$$

Опыты производившиеся автором в 1916 г. на б. Х.-Н. ж. д. показали, что формула эта верна и для русских условий. Интересно отметить, что для полногрузных вагонов американского типа для обычных скоростей

$$V = 10 - 35$$

¹⁾ Лебедев. Опыты 1912—1913 гг. над сопротивлением пассажирских паровозов и вагонов Русской сети, СПб. 1914, стр. 20—21.

²⁾ Вестник Общ. Технологов. 1908, стр. 96.

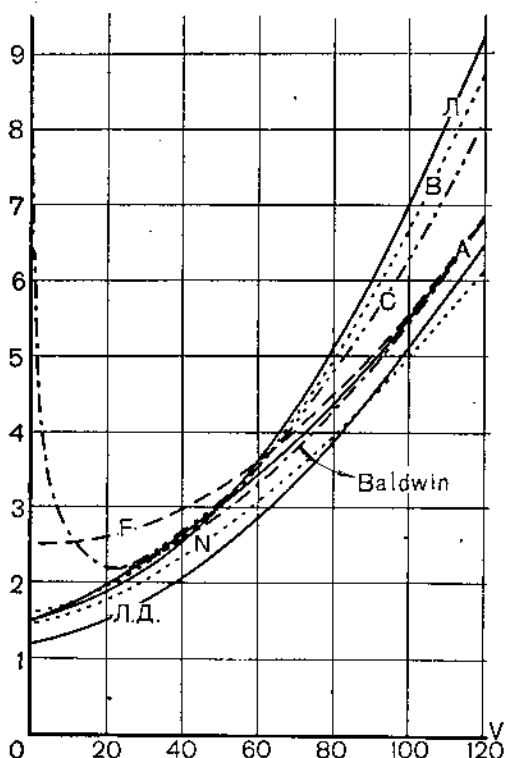
³⁾ Бюллетень № 43 Экспериментального Института при Иллинойском Университете „Freight Train Resistance, by Edward C. Schmidt“.

сопротивление почти не зависит от скорости. Именно для грубых расчетов можно считать

$$w_0'' = 2.$$

§ 31. Формулы для полного сопротивления паровозов.

Как уже было указано выше, полное сопротивление паровоза с тендером складывается из двух частей: сопротивления паровоза, как



Фиг. 27.

повозки W_0' и сопротивление паровоза, как машины W_m . Большинство исследователей, однако, не разделяют этих сопротивлений и дают свои формулы для полного удельного сопротивления паровоза вместе с тендером

$$w_0' + w_m = \frac{W_0' + W_m}{P}.$$

Из числа таких формул наибольшим распространением пользуются формулы: Петрова для пассажирских паровозов

$$w_0' + w_m = 2,3 + 0,15 V + 0,001 V^2,$$

его же для товарных ¹⁾

$$w'_0 + w_m = 4,3 + 0,15 V + 0,001 V^2,$$

Франка ²⁾

$$w'_0 + w_m = 2,5 + 0,067 \left(\frac{V}{10} \right)^2,$$

Барбье ³⁾ для пассажирских паровозов типа де Глена

$$w'_0 + w_m = 3,8 + 0,9 V \frac{V + 30}{1000}$$

и Надаля ⁴⁾, который дает для быстроходных паровозов 2-2-0

$$w'_0 + w_m = 3,8 + 0,66 V \frac{V + 40}{1000},$$

для пассажирских 2-3-0

$$w'_0 + w_m = 4 + V \frac{V + 30}{1000}$$

и для товарных 1-4-0

$$w'_0 + w_m = 6,5 + 0,66 V \frac{V + 200}{1000}.$$

Кроме того, для паровозов 0-4-0 и 1-4-0 были предложены формулы Вюртембергских ж. д. ⁵⁾

$$w'_0 + w_m = 3,7 + 0,0226 V + 0,00065 V^2,$$

и австрийской Южной дороги (Südbahn) ⁶⁾

$$w'_0 + w_m = 6,5 + 0,135 V + 0,00065 V^2,$$

причем последняя дает результаты совершенно тождественные с формулой Надаля.

Наконец, в последнее время Занцын ⁷⁾ и Лейтцман ⁸⁾ предложили свои формулы вида

$$w'_0 + w_m = A V^2 + B V + C.$$

¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. 1889, стр. 229-232.

²⁾ Zeitschrift des V. D. I. 1907, стр. 95.

³⁾ Revue Générale. 1898, I. S., стр. 3, или Blum, von Borries, Barkhausen. Die Eisenbahntechnik der Gegenwart. I. 1903, стр. 66.

⁴⁾ Nadal. Locomotives à vapeur. 1908, стр. 282.

⁵⁾ Organ. 1908, стр. 415.

⁶⁾ Чечотт. Новый метод расчета времен перегонов. 1910, стр. 10.

⁷⁾ Zeitschrift des V. D. I. 1911, стр. 1461-1465.

⁸⁾ Leitzmann und v. Borries. Theoretisches Lehrbuch des Lokomotivbaues. 1911, стр. 283.

коэффициенты которых меняются, как показано в таблицах VIII—IX, в зависимости от типа паровозов. Такая зависимость

Таблица VIII. Sanzin.

Тип	Прибли- зительное D	Прибли- зительное P	C	B	A
0-5-0	1300	120	4,0	0,028	0
1-4-0	1300	120	6,5	0,135	0,00065
0-4-0	1300	90	4,0	0,027	0
2-3-0	1700	115	4,2	0	0,002
2-2-1	2000	100	3,2	0,026	0,00055

Таблица IX. Leitzmann.

Тип	D	Система машины	C	$\frac{1}{B}$	$\frac{1}{A}$
2-2-0	1980	2 цил. компаунд	2,4	80	2286
2-2-1	„	4 „ „	3,0	29	1778
0-4-0	1250	2 „ „	3,9	5,7	500

несомненно имеет место в действительности: с одной стороны она объясняется тем, что, как мы видели на стр. 56—57, сопротивление паровоза, как повозки, должно возрастать с уменьшением диаметра колес. С другой же стороны сопротивление паровоза, как машины, очевидно, зависит от числа спаренных осей и от конструкции движущего и парораспределительного механизмов.

Кроме указанных выше формул, претендующих на распространительное применение, следует указать еще на формулы Лопушинского для двух типов паровозов Влк. ж. д.¹⁾ а именно для 2-3-0 серии Г

$$w'_0 + w_m = 3,9 + 0,014 V + 0,0017 V^2$$

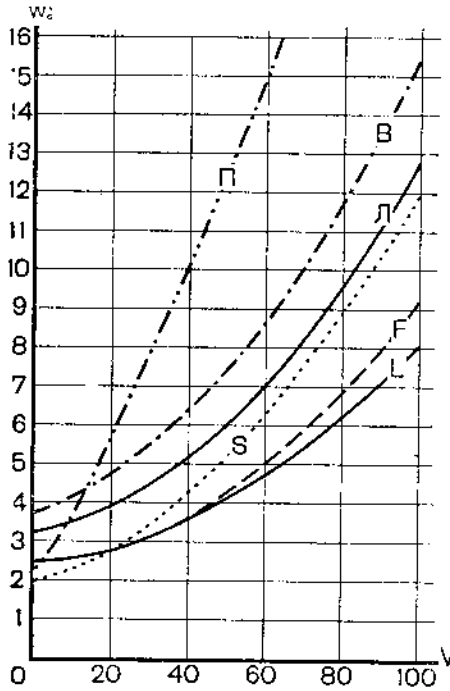
¹⁾ Исследования и опытные данные о работе паровозов трех новейших типов Влк. ж. д. 1906, стр. 340.

и для 2-2-0 серии Д

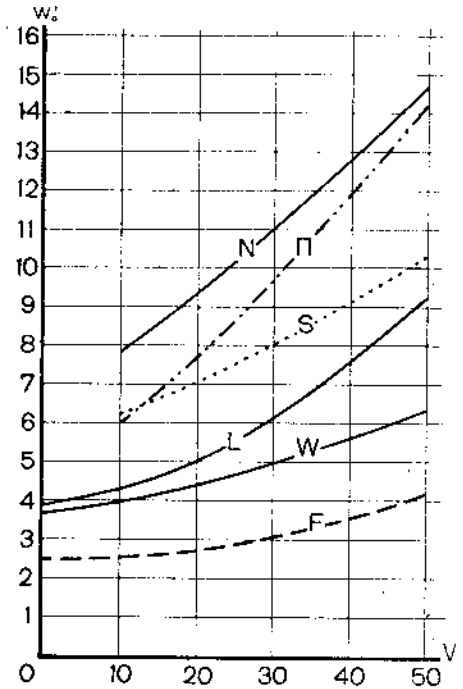
$$w'_0 + w_m = 3,3 + 0,014 V + 0,0008 V^2$$

Формулы имеют для нас особую ценность, ибо они получены из весьма обстоятельных опытов, произведенных в русских условиях и русскими типами паровозов.

Для сравнительной оценки приведенных формул на фиг. 28 сопоставлены те из них, которые относятся к пассажирским па-



Фиг. 28. Паровозы 2-2-0.



Фиг. 29. Паровозы 0-1-0 и 1-4-0.

ровозам с двумя спаренными осями, а на фиг. 28 те, которые рекомендуются для товарных паровозов с 4 спаренными осями. Из этих фигур мы видим, что формулы для сопротивления паровозов расходятся между собой гораздо больше, чем формулы для сопротивления вагонов. Особенно любопытно, что наибольшая разница (до 300%) наблюдается между формулами Петрова и Франка, которые обе претендуют на теоретическое обоснование.

Что касается пассажирских паровозов (фиг. 28), то формулы для них можно разделить на три группы: наименьшие результаты для $w'_0 + w_m$ дают формулы Франка и Лейтцмана, наибольшие формула Петрова, а посреди лежат формулы Барбье, Лопушин-

ского и Занцина. Они повидимому и заслуживают наибольшего доверия, особенно если принять тщательность опытов Барбье и Лопушинского и тот факт, что производились они разными способами: Барбье определял $w'_0 + w_m$ помощью индикаторов и динамометра, а Лопушинский путем скатывания паровозов без пара.

Всматриваясь же более внимательно в фиг. 23 мы видим, что формулы для товарных восьмиколесных паровозов можно разделить на две категории: согласно одним (Франка, Лейтцмана, Вюртембергская) сопротивление паровоза с тендером при скоростях около 10 km/h равно 2—4 kgf на тонну, а по другим (Надаль, Петров) 6—8 kgf. К истине ближе, повидимому, формулы второй категории: в этом нас убеждают два факта: во-первых, известно, что нормальный паровоз резервом по 5⁰/₁₀₀ уклону без пара идти не может, а во-вторых, из опытов Х.Н. ж. д. следует, что при обычных условиях работы сопротивление нормальных паровозов на тонну веса вместе с тендером достигает 7—9 kgf¹⁾.

§ 32. Формулы для сопротивления паровозов как паровозок. Все приведенные выше формулы обнимают сопротивление паровоза и как машины, и как повозки. Между тем, если мы хотим пользоваться нашей основной формулой уравнения движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_k - W_k}{P + Q},$$

то в сопротивление

$$W_k = Pw'_0 + Qw''_0 + (P + Q)(i + k)$$

надо включать только сопротивление паровоза, как повозки. Величину w'_0 легко найти из опыта, измеряя сопротивление паровозов со снятыми шатунами. К сожалению, опыты эти производились в сравнительно ограниченном размере и полученные во время них формулы обнимают далеко не все типы паровозов. Из заграничных опытов этого ряда надо отметить опыты Де-дуй²⁾, но главная масса их была произведена в России при опытном исследовании разных типов паровозов³⁾. На фиг. 30 представлены результаты этих опытов для пассажирских паровозов разных серий. Из нее мы видим, что w'_0 для всех этих типов

¹⁾ Ломоносов. Опытное исследование паровозов — компаунд нормального типа. 1907, стр. 219.

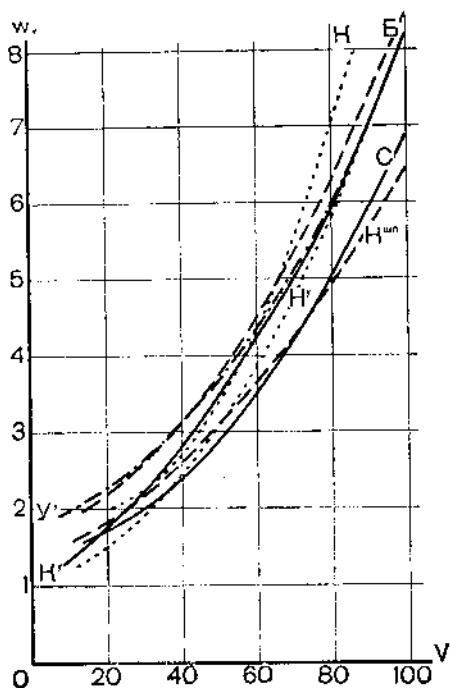
²⁾ Revue Générale. 1890. I S., стр. 284—285.

³⁾ Лебедев. Опыты 1912—1913 гг. над сопротивлением пассажирских паровозов и вагонов Русской сети СИБ. 1914, стр. 1—15.

настолько мало отличается друг от друга, что все они могут быть объединены одной формулой. Такая формула

$$w_0 = 1,3 + 0,02 V + 0,0005 V^2$$

и была предложена Лебедевым ¹⁾. Широкое применение ее при



Фиг. 30.

С 1-3-1 Прери типа Сормовского завода.

К 2-3-0 типа Коломенского завода.

Б 2-3-0 типа Брянского завода.

Кв 2-3-0 М.-Казанской ж. д. (D = 1900).

Ун 2-3-0 Р.-У. ж. д. системы де Глена с перегревом.

Нв 1-3-0 усиленного Николаевского типа.

Н''' 1-3-0 с перегревом и машиной Штумпфа.

так называемых опытах II цикла, когда тяговые расчеты подвергались проверке путем специально обставленных опытных поездок, показало полную ее надежность.

Что же касается товарных паровозов 0-4-0 и 1-4-0 разных типов, а также паровозов системы Маллета, то для них мож-

¹⁾ Впоследствии он разбил эту формулу на две: для паровозов с одной и для паровозов с двухосной тележкой.

но пользоваться формулой автора

$$w'_0 = 1,4 + 0,04 V + 0,0006 V^2$$

что сравнительно мало отличается от формулы Балдвина

$$w'_0 = w''_0 = 1,5 + \frac{V}{20},$$

по которой американцы определяют полное сопротивление товарных поездов, и которая, как показывает фиг. 24, очень хорошо выражает сопротивление груженных товарных вагонов.

Это обстоятельство позволяет рекомендовать формулу Балдвина для определения сопротивления

$$w'_0 \sim w''_0$$

товарных груженных поездов. Совершенно иначе обстоит дело с формулой германских инженеров

$$w'_0 = 2,4 + \frac{V^2}{1000},$$

применяемой и к пассажирским и к товарным поездам: отсутствие члена с 1-ой степенью скорости и преувеличенное значение коэффициента при V^2 заставляет сомневаться в возможности ожидать от нее сколько нибудь надежных результатов.

Да и вообще гипотеза

$$w'_0 = w''_0$$

довольно близкая к действительности для товарных груженных поездов, не всегда применима для пассажирских поездов, там лучше подсчитывать отдельно w'_0 и w''_0 .

§ 33. Сопротивление паровоза при закрытом регуляторе.

Сопротивление w'_0 очевидно не зависит от действия пара в цилиндрах, сопротивление же w_m , благодаря перекачиванию воздуха при закрытом регуляторе с одной стороны поршня на другую, больше, чем при открытом. Поэтому и полное сопротивление паровоза, идущего без пара

$$w'_0 + w'_m > w'_0 + w_m.$$

Численное значение w'_m , а следовательно и $w'_0 + w'_m$ обуславливается размерами цилиндров и конструкций приспособлений для уменьшения перекачивания воздуха. Так, по опытам 1913 г. ¹⁾

¹⁾ Лебедев. Опыты 1912–1913 гг. СПб. 1914, стр. 19.

для паровозов 0—4—0 компаунд нормального типа, снабженного лишь клапанами Риккура

$$w'_0 + w'_m = 4,0 + 0,16 V + 0,002 V^2$$

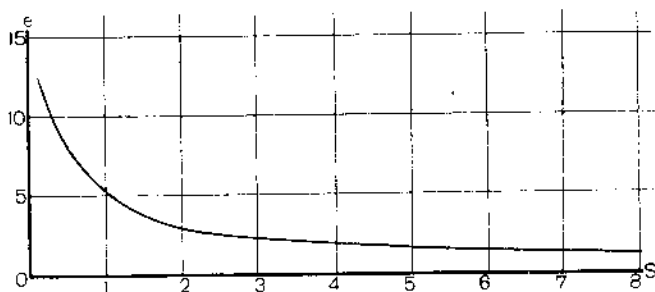
для паровоза 1—3—1 С некомпануд с байпасами Зяблова

$$w'_0 + w'_m = 3,0 + 0,04 V + 0,0006 V^2 + 0,000013 V^3$$

а для паровоза 2—3—0 К^у, снабженного перепускными клапанами Мейнике

$$w'_0 + w'_m = 2,0 + 0,06 V + 0,0004 V^2 + 0,000013 V^3.$$

В эти формулы скорость входит уже в кубе, что однако не представляет ничего неожиданного, так как Рёкль, а после него Дедуи вводили в формулы сопротивления паровоза при закры-



Фиг. 31.

том регуляторе член с V^3 . При этом Дедуи отмечал, что этот член характеризует именно сопротивление механизма паровоза ¹⁾.

§ 34. Влияние погоды на сопротивление поездов. Выше было уже отмечено, что приведенные формулы сопротивления относятся к средним условиям погоды. Летом в теплую и тихую погоду сопротивление поезда бывает несколько меньше; зимой при морозах и вьюгах, как показывают фиг. 25 и 27, значительно больше. Увеличение сопротивления поезда в зимнее и осеннее время обуславливается тремя причинами: понижением температуры наружного воздуха, значительными ветрами, бывающими у нас в эти времена года, и лежащим иногда на рельсах слоем снега.

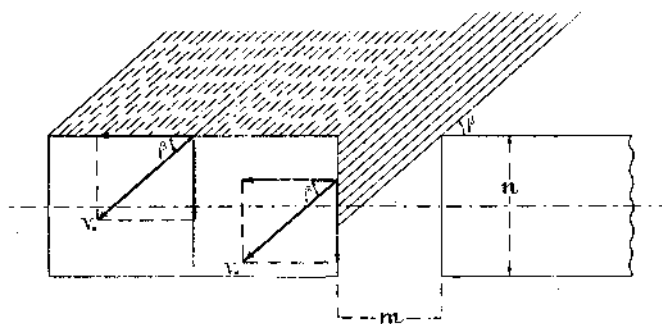
Понижение температуры наружного воздуха вызывает сгущение смазки в буксах и увеличение коэффициента трения в шейках. Особенно это чувствуется при трогании с места состава, простоявшего долго на морозе. Наглядной иллюстрацией этого явления служит фиг. 31, относящаяся к поезду с дачным

¹⁾ Романов. Паровозы. 1900, стр. 123.

составом весом 425 тонн, после того как он 6 часов простоял при температуре -15°R . По оси абсцисс на этой фигуре отмечены расстояния в верстах от станций отправления, а по оси ординат удельное сопротивление вагонов сверх нормального, т. е.

$$e = w'' - w_0'',$$

где w'' удельное сопротивление, определенное непосредственным измерением, а w_0'' определенное по формуле Лебедева. Из этой фигуры мы видим, что в момент трогания с места w'' достигало 17 kgt на тонну, т. е. превышало расчетное в 11 раз, а затем оно постепенно падало и верст через 25 вошло в норму. При очень сильных морозах, как показали опыты Сибирской ж. д.¹⁾, такого равновесия не достигается, и на протяжении всего пути e оказывается значительно больше нуля.



Фиг. 32.

У проф. Шмидта, исследовавшего этот вопрос в Америке,²⁾ кривая

$$e = f'(s)$$

получились тоже очень близкими к нашей фиг. 31.

Что касается влияния ветра, который может быть и летом, то оно складывается из четырех факторов. Во-первых, при скорости ветра V_a km/h, составляющей с направлением движения угол β , относительная скорость движения лобовой поверхности паровоза и воздушной среды будет уже не V , а

$$V + V_a \cos \beta$$

и, следовательно, лобовое сопротивление не

¹⁾ Карташев. Опоздание поездов вследствие недостатков и неправильного выбора смазочных материалов СИБ. 1911.

²⁾ Bulletin du C. I. des chemins de fer. 1913, стр. 665—666.

$$\alpha \Omega' V^2$$

а

$$\alpha \Omega' (V + V_a \cos \beta)^2.$$

Во-вторых, к каждому вагону оказывается приложенным дополнительное лобовое сопротивление

$$\alpha \Omega_a'' V_a^2 \cos^2 \beta,$$

где

$$\Omega_a'' = \Omega'' \frac{m \tan \beta}{n},$$

т. е. добавочное сопротивление, равное

$$\alpha \Omega'' \frac{m}{n} \sin \beta \cos \beta,$$

которое обращается в нуль при $m = 0$, т. е. при употреблении гармоний во всю ширину вагона. В-третьих, при ветре увеличивается трение надветренной стороны поезда от воздуха, так как с этой стороны относительная скорость воздуха и поезда будет равна

$$V + V_a \cos \beta.$$

Наконец, в-четвертых, благодаря ветру, к паровозу и каждому вагону с надветренной стороны оказывается приложенной сила

$$\alpha \Omega_m V_a^2 \sin^2 \beta,$$

где Ω_m боковая поверхность паровоза или вагона. Силы эти стремятся сдвинуть поезд в бок и тем вызывают увеличение трения первого рода между колесами и рельсами.

В пустынях Средней Азии скорость ветра достигает до 100 km/h, что вызывает увеличение удельного сопротивления на 5 и даже больше килограмм, в Европейской же России увеличение удельного сопротивления от ветра не превосходит 2—3 килограмм. Надо, однако, заметить, что столь сильные ветры, которые правильнее называть ураганом (бураном, самумом) бывают сравнительно редко и продолжаются обычно всего лишь несколько часов. Поэтому выгоднее мириться с тем замешательством, которое они нередко вносят в движение, чем круглый год в расчете на них не пользоваться полною мощностью паровозов.

Переходим теперь к добавочному сопротивлению от снега на рельсах. Сопротивление это при отсутствии столь значительных запасов, что в них подвижной состав прямо завязает, обуславливается увеличением трения второго рода между колесами

и рельсами. При толщине слоя в несколько сантиметров это добавочное сопротивление может быть весьма значительно. Но опять таки подобные, сравнительно редкие, случаи вводить в расчеты было бы неправильно. Наличие же на рельсах слоя снега в 2—3 м.м вызывает увеличение w не более 0,5 kgf на тонну.

Сказанного, полагаю, достаточно, чтобы выяснить физическую природу влияния погоды на сопротивление поезда. К сожалению, для наших прикладных целей этого еще не достаточно; нам нужны определенные указания, как это влияние следует учитывать в тяговых расчетах.

Что касается влияния температуры, то Петров предложил его оценивать формулой

$$w_t = 0,2 - 0,015 t, ^1)$$

где t внешняя температура в градусах Цельсия. Формула эта при изменении температуры от $+20^\circ\text{C}$ до -20°C дает увеличение удельного сопротивления поезда только на 0,6 kgf, между тем, как при зимних опытах 1912—1913 гг. на Ник. и М.-К. ж. д. мы получали значительно большие цифры; кроме того, она не учитывает увеличения сопротивления в начале поездки, о чем говорилось на стр. 84. Для оценки влияния снега не было предложено вовсе формул. Влияние же ветра Петров оценивает для вагонов формулой

$$w_v = 0,0045 \frac{v_a^2}{q},$$

причем при выводе ее принималось только поперечное действие силы

$$a Q_m v_a^2 \sin^2 \beta, ^2)$$

Насколько формулы Петрова правильно оценивают влияние температуры и ветра видно из фиг. 33 (стр. 88), где сплошными линиями показаны средние месячные значения полного удельного сопротивления вагонов

$$w'' = w_0'' + i + k$$

на участке Николаев-Долинская (А) и обратно (В), полученные из почти ежедневных поездок Теодоровича по этому участку с его динамометром в 1896 г.³⁾, а пунктирными — результаты

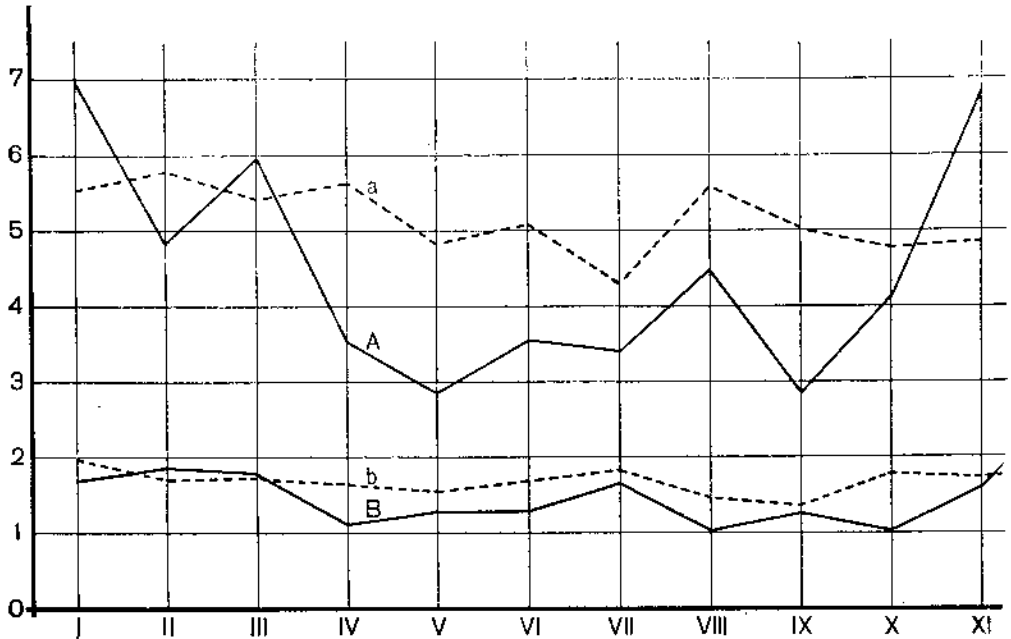
¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на ж. д. 1889, стр. 251—254.

²⁾ См. Чечотт. Новый метод . . . , стр. 24—25.

³⁾ Опыты эти к сожалению нигде не опубликованы.

подсчетов по формулам Петрова, после подстановки в них действительных температур воздуха и измеренных анемометром Козелли значений скорости ветра.

Позволительно, впрочем, думать, что предложить какую либо формулу для оценки влияния ветра вообще нельзя, ибо не говоря уже о резких изменениях в его силе, даже при совершенно равномерном движении воздуха влияние его на w весьма сильно зависит от его направления, а это последнее в криволинейных частях пути непрерывно меняется. Столь же неопределенной



Фиг. 33. Николаев—Долгинская. 1896.

является и задача о влиянии снега, которое зависит от толщины и плотности слоя его на рельсах. Все это заставляет сомневаться в возможности оценить какой либо формулой влияние погоды вообще. Единственно правильным путем для введения в тяговые расчеты надежных данных этого рода является поэтому производство на разных участках дороги специальных опытов в разное время года. Но надо помнить, что результаты эти можно распространять на другие участки с чрезвычайной осторожностью, ибо такие обстоятельства, как расположение около полотна леса, глубина выемок и пр., весьма заметно изменяют влияние погоды и в частности ветра.

Результаты таких опытов могут выражаться или в виде формул, как это для пассажирских поездов на участке Тверь—

Москва было сделано Лебедевым, Любимовым и Дадаевым (фиг. 27) или в виде средней прибавки

$$e = w_t + w_a + w_c \dots \dots \dots 37$$

для данного участка, как это делалось при опытах Жебровского и Чечотта ¹⁾ на Ташк. ж. д. Первый прием правильнее, ибо несомненно влияние погоды при больших скоростях сказывается сильнее, чем при малых, но последнее удобнее.

При отсутствии же подобных данных для зимы в пределах Европейской России севернее дуги большого круга, соединяющей Ригу и Астрахань можно считать

$$e = 1,$$

как это и рекомендуется при расчетах расписаний воинских поездов, а южнее

$$e = 0,5;$$

сверх того для первых трех верст от начальной станции полезно прибавлять

$$e' = 2,$$

а на следующих пяти

$$e' = 1.$$

¹⁾ Опыты эти еще не опубликованы.

ГЛАВА IV

Тормазное усилие.

§ 35. Законы трения между колесами и колодками. Помимо рассмотренных выше, так сказать, естественных сопротивлений, для уменьшения скорости поезда и возможности быстро остановить его, в нем возбуждаются искусственные сопротивления в виде сил трения между некоторыми колесами и тормазными колодками.

Равнодействующая этих сил B_k называется тормазным усилием. Так как, с одной стороны, для каждого тормазного колеса сила трения равна

$$\varphi_k X,$$

где φ_k коэффициент трения, а X сила нажатия колодки, а с другой стороны, все эти силы приложены к ободу колес, вследствие чего для них

$$\frac{dr}{ds} = 1,$$

то

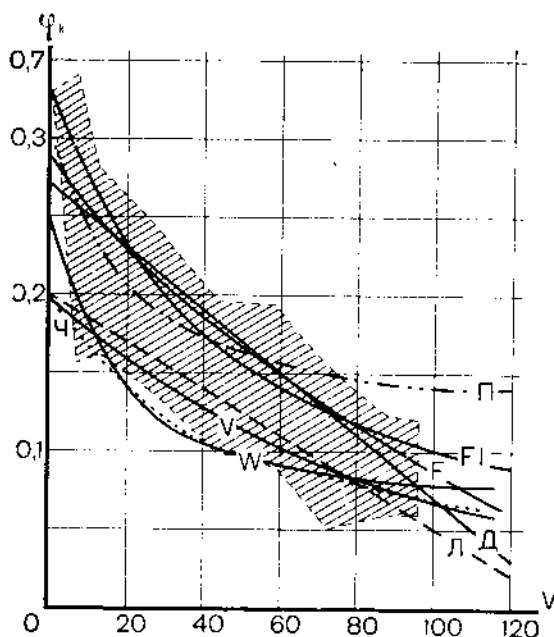
$$B_k = \varphi_k \Sigma X \dots \dots \dots 38.$$

Формула эта показывает, что изучение тормазного усилия сводится к изучению φ_k и X .

Коэффициент трения первого рода между двумя твердыми телами не есть величина постоянная: как показали еще опыты Пуаре (1856), она падает с увеличением скорости. Для тормазов это обстоятельство имеет чрезвычайно важное значение, ибо при равных прочих условиях оно делает их менее деятельными именно там, где от них требуется особая надежность, т. е. при больших скоростях. Поэтому для изучения зависимости между φ_k и V , специально у тормазов, производились весьма обширные опыты,

из которых на первое место следует поставить опыты Гальтона¹⁾, произведенные в конце семидесятых годов на английской дороге Лондон—Брайтон (London—Brighton and South Coast).

Результаты опытов Гальтона представлены на фиг. 34 в виде заштрихованной площади, внутри которой расположились его



Фиг. 34. D. Galton.

точки, относящиеся к стальным бандажам и чугунным колодкам. Значительная разбросанность этих точек объясняется тем, что величина φ_k кроме Γ зависит еще от целого ряда факторов, из которых главными являются условия погоды и продолжительность нажатия колодок. Специальные опыты Гальтона показали, что прижатая колодка очень быстро пришлифовывается к колесу, результатом чего является понижение φ_k . Для примера на фиг. 35 приведены результаты этих опытов для скоростей в 30 и 55 километров в час в функции продолжительности нажатия. При наличии же влаги это пришлифование происходит еще более интенсивно. Наконец, при обледенелых колодках, что у нас зимой особенно в пассажирских составах бывает нередко, φ_k уменьшается еще больше.

¹⁾ Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1878, стр. 467 590; 1879, стр. 170.

Сам Гальтон в виду всех этих обстоятельств не дал для φ_k никакой эмпирической формулы; это на основании его опытов сделали другие, а именно Франк, предложивший формулу

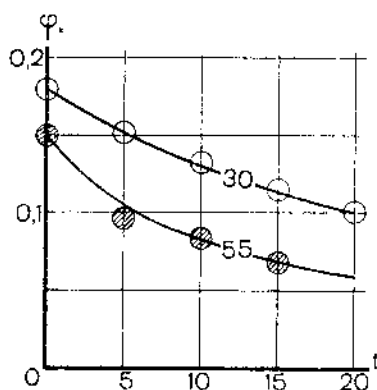
$$\varphi_k = 0,29e^{-\frac{v}{90}},$$

Флигнер

$$\varphi_k = \frac{14,8}{45 + V} + \frac{0,33}{1 + 0,022 V},$$

что очень близко подходит к формуле Пуаре

$$\varphi_k = \frac{0,33}{1 + 0,02 V},$$



Фиг. 35 Galton.

приведенной на стр. 2 для трения колес о рельс, и Дуаен

$$\varphi_k = 0,27 - 0,002 V^2).$$

Все эти формулы нанесены на фиг. 34, из которой мы видим, что все они дают результаты очень близкие друг к другу. Это обстоятельство позволяет отдать решительное предпочтение формуле Дуаена, как простейшей.

С другой стороны, та же фиг. 34 показывает нам, что все эти формулы располагаются в верхней трети заштрихованной площади, т. е. соответствуют тем из опытов Гальтона, которые производились при сравнительно благоприятных условиях. Благодаря этому, при плохой погоде формулы Франка, Флигнера и Дуаена дают преувеличенные значения φ_k . Этим обстоятельством и были вызваны последующие опыты над величиной φ_k , из числа которых надо отметить опыты Кассельской дирекции Прусских Государственных дорог²⁾, опыты Вихерта³⁾ и опыты Сперри⁴⁾ (последние специально для электрических трамваев в 1894 г.).

На основании Кассельских опытов Союз Германских Инженеров (Verein D. I.) предложил формулу

¹⁾ Чечотт (Новый метод..., стр. 153) неправильно называет эту формулу формулой Мухачева; последний на стр. 537 своей книги „Теория и конструкция паровозов“ (1895) сам указывает, что она принадлежит Дуаену. Последний опубликовал ее в Revue Industrielle в 1893 г.

²⁾ Чечотт. Новый метод..., стр. 133.

³⁾ Organ, 1889, стр. 72 и 122.

⁴⁾ Blondel et Paul Dubois. La traction électrique. II. (1898), стр. 732.

$$\varphi_k = 0,20e^{-\frac{v}{90}},$$

получающуюся из формулы Франка путем уменьшения φ_k в отношении

$$\frac{20}{29} \approx \frac{2}{3}.$$

С другой стороны, на основании тех же опытов Петров дал свою формулу

$$\varphi_k = \frac{0,2}{1 + 0,0472 V} + 0,104,$$

которая, как показывает фиг. 34 (кривая II), располагается при больших скоростях выше всех остальных формул и даже выходит из района точек Гальтона. Вихерт же на основании своих опытов для неблагоприятных условий погоды предложил формулу

$$\varphi_k = 0,25 \cdot \frac{1 + 0,0112 V}{1 + 0,06 V},$$

представленную на фиг. 34 кривой W, которую Чечотт предлагает исправить, как показано пунктиром из одних точек.

Резюмируя сказанное, мы видим, что, исходя из опытов Гальтона, для сравнительно благоприятных условий можно рекомендовать формулу Дуаена

$$\varphi_k = 0,27 - 0,002 V,$$

а для неблагоприятных формулы Вихерта, Союза и очень близкую к этой последней формулу автора

$$\varphi_k = 0,20 - 0,0015 V.$$

§ 36. Сила нажатия колодок. На первый взгляд сила X всецело зависит от нашего произвола, и, увеличивая ее, мы можем беспредельно увеличивать тормазное усилие. В действительности, однако, возрастание B вместе с X имеет место только до некоторого предела. В самом деле, зависимость

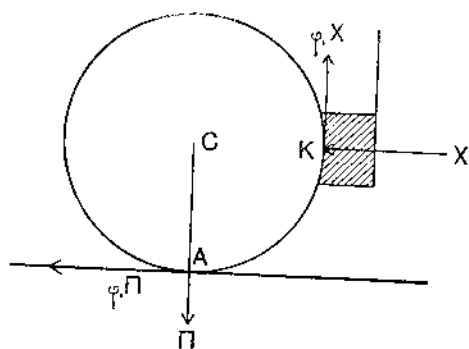
$$B = \varphi_k X$$

имеет место только до тех пор, пока относительная скорость в точке К (фиг. 36) не равна нулю. Если же мы доведем X до такого предела, что колодка заклинит колесо, и оно начнет скольз-

зять по рельсу, то в точке **К** никакого трения не будет, а тормозящим усилием явится сила трения колеса о рельс

$$B' = \varphi \Pi, \quad 39$$

приложенная в точке **А**. Поэтому, насколько бы мы ни увели-



Фиг. 36.

чивали силу X сверх предела, вызывающего заклинивание колеса, тормозящее усилие не увеличится.

Пока колесо катится, точка **А** (фиг. 36) является мгновенным центром, и сила трения между колесом и рельсом, препятствующая заклиниванию колеса, равна

$$\varphi_0 \Pi,$$

где Π нагрузка на колесо, а φ_0 коэффициент трения при скорости равной нулю. Очевидно, качение колеса будет иметь место, пока

$$\varphi_k X < \varphi_0 \Pi,$$

т. е. пока

$$X < \frac{\varphi_0}{\varphi_k} \Pi.$$

Если же мы доведем X до значения

$$X_0 = \frac{\varphi_0}{\varphi_k} \Pi,$$

соответствующего

$$B_0 = \varphi_0 \Pi,$$

то колесо заклинится и начнет скользить по рельсу, а тормозящим усилием сделается

$$B' = \varphi \Pi < B_0,$$

ибо, как мы видели, при любой скорости

$$\varphi < \varphi_0.$$

Таким образом зависимость между тормазным усилием B и нажатием X имеет вид, указанный на фиг. 37: при

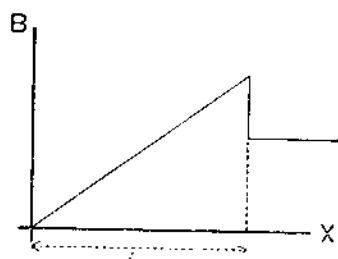
$$X < X_0$$

B прямо пропорционально X , затем оно падает сразу до значения

$$B = \varphi \Pi$$

и при дальнейшем увеличении X сохраняет это значение.

Здесь необходимо отметить, что помимо уменьшения B заклинивание тормазных колес вызывает образование на них выбоин, и, кроме того, уменьшает сопротивление W_0 , ибо при скольжении колес по рельсам отсутствуют трение в шейках и сопротивление перекачиванию. Благодаря этому, вместо полного сопротивления за- тормаженого поезда



Фиг. 37.

$$W_0 + B_k,$$

которое имеет место на прямом и горизонтальном пути при катящихся колесах, при скользящих мы получим

$$W_0 + B_k = W_2 - W_3.$$

Отсюда ясно, что, не говоря уже о выбоинах, ради самого эффекта тормажения должно быть всегда выполнено условие

$$X < \frac{\Pi \varphi_0}{\varphi_k},$$

и выполнено при том для каждой тормазной оси. Из сказанного следует, что оно должно быть выполнено и для совпадения наименьшего φ_0 с наибольшим φ_k , т. е.

$$X < \frac{\min \varphi_0}{\max \varphi_k} \Pi \dots \dots \dots 40.$$

Так как помощью песка φ_0 всегда можно поддержать больше

0,25, то в этой формуле $\min. \varphi_0$ можно считать равным 0,25, наибольшее же значение φ_k по опытам Гальтона для средних условий можно принять равным 0,3. При этих цифрах неравенство 40 получает вид

$$X \leq 0,83 H \dots \dots \dots 40a.$$

Этого соотношения и придерживаются при проектировании тормазных передач товарных вагонов, а также и пассажирских, предназначенных для горных участков или для дачного движения, где быстрота остановок имеет особое значение. Для пассажирских же вагонов дальнего следования, обращающихся по равнинным дорогам, максимум отношения

$$\delta = \frac{X}{H} \dots \dots \dots 41$$

берут обычно, во избежание беспокойства пассажиров резким тормажением, между 35 и 50%. Этих же норм во избежание значительного износа бандажей придерживаются и для движущих осей паровозов. Что касается тендеров, то по отношению к ним наблюдается два течения. С одной стороны, нежелательные последствия образования выбоин на тендерных осях в смысле воздействия на путь¹⁾ заставляют уменьшать $\max. \delta$ для тендеров до 55% от тары²⁾; а с другой стороны, соображение, что тендера никогда совершенно пустыми с поездами не ходят, дает право доводить для них δ до 100 и даже 130%, как это сделано на 3-осном „усиленном“ тендере нормального паровоза³⁾. Заграничная и особенно американская практика придерживается второго направления. Оно имеет для нас за собой и то соображение, что в товарных поездах тендер является главным тормазным аппаратом в поезде.

Указанные нормы относятся к проектам разных видов подвижного состава. На паровозах, тендерах и пассажирских вагонах, находящихся под непрерывным техническим наблюдением, они более или менее сохраняются и в условиях повседневной службы. Совершенно иначе обстоит дело с товарными вагонами, состояние которых у нас заставляет желать много лучшего. По специальным опытам Борцова и Рубацова, над вагонами кон-

¹⁾ Васютынский. Наблюдения над упругими деформациями ж. д. пути. 1899, стр. 78.

²⁾ Приказ Министра Путей Сообщения 1899 г. № 65.

³⁾ Протоколы XXIX Сов. Съезда сл. тиги, стр. 404.

венционного осмотра в Нижне-Днепровских мастерских¹⁾ оказалось, что увеличение δ для нормальных вагонов свыше 50—60% от тары в большинстве случаев, не представлялось возможным, вследствие деформации частей вагона, соединенных с тормазной передачей. Кроме того, для некоторых вагонов коэффициент полезного действия этой передачи оказался настолько мал, что даже при отсутствии указанных деформаций силы одного человека недостаточно для реализации $\delta = 0,85$, как это предвидено проектом.

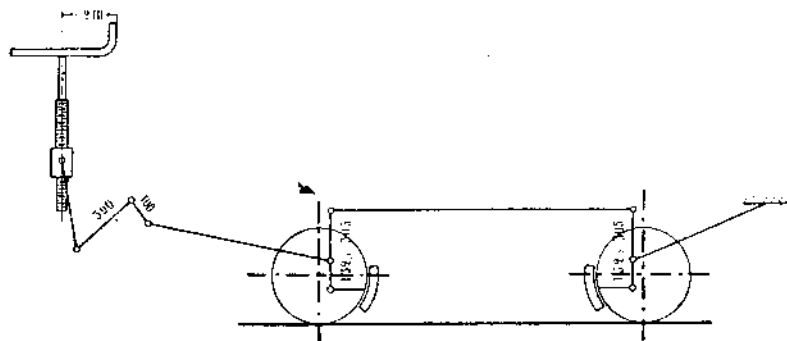
В виду всего сказанного принимать для русских товарных вагонов X больше 50% тары представляется весьма рискованным.

В заключение в виде примера приведем расчет δ для русского нормального вагона²⁾. Такие проверки для новых типов паровозов и вагонов при тяговых расчетах приходится производить довольно часто. Схема тормазной передачи этого вагона изображена на фиг. 38. Назовем средний диаметр винта через d ($36\frac{1}{2}$ м/м), ход его через h ($9\frac{1}{2}$ м/м), угол винта через

$$\alpha = \arctg \frac{h}{\pi d}$$

и диаметр рукоятки через D (420 м/м). Тогда передаточное число рукоятки

$$m_1 = \frac{D}{d} = \frac{420}{36\frac{1}{2}} = 11,5,$$



Фиг. 38.

а винта

$$m_2 = \frac{1}{\operatorname{tg} (\alpha + \arctg \varphi)}^3),$$

¹⁾ Протоколы заседаний первого Технического Совещания старших агентов сл. тяги Екатерининской ж. д. Е-слав. 1904, стр. 17—24.

²⁾ Протоколы XXIX Сов. Съезда сл. тяги, стр. 401—402.

³⁾ Радциг. Прикладная механика, стр. 56.

где φ коэффициент трения, который при хорошей смазке можно считать около 0,07, и который из осторожности мы примем равным 0,15, и рычагов

$$m_3 = \eta_3 \frac{390}{100},$$

где η_3 коэффициент рычажной передачи, который можно принять равным 0,9. При этих цифрах

$$m_2 = \frac{1 - \frac{\varphi h}{\pi d}}{\frac{h}{\pi d} + \varphi} = \frac{\pi d - \varphi h}{h + \pi d \varphi} = \frac{3,14 \times 36,5 - 0,15 \times 9,5}{9,5 + 3,14 \times 36,5 \times 0,15} = 4,25$$

$$m_3 = 0,9 \frac{390}{100} = 3,5,$$

а общее передаточное число

$$m = m_1 m_2 m_3 = 11,5 \times 4,25 \times 3,5 = 170.$$

При продолжительной работе усилие человека на рукоятку можно считать в среднем около $12\frac{1}{2}$ килограмм¹⁾; допуская же, что при сравнительно кратковременной работе подтягивания тормоза это усилие может быть утроено, мы получим наибольшее нажатие на все 4 оси вагона

$$\max \Sigma X = 3 \times 12,5 \times 170 = 6400 \text{ kgr.}$$

Тара тормозного крытого вагона равна 450 пуд., или 7400 kgr., откуда для этого вагона теоретическое

$$\max \delta = \frac{64}{74} = 0,86,$$

что очень близко к норме указанной на стр. 97. Во время же опытов Борщова и Рубанова при усилии на рукоятку в $37\frac{1}{2}$ килограмм $\max \delta$ колебалось в пределах от 45 до 65% и в среднем было ими принято в 53%. Таким образом, даже для лучших вагонов действительное нажатие составляло 75% от теоретического, а в среднем оно равнялось всего 61% теоретического.

§ 37. Тормозное усилие всего поезда. Если для каждой тормозной повозки значение

$$\delta = \frac{X}{H} \dots \dots \dots 41$$

¹⁾ Романов. Подъемные машины. 1903. Стр. 76.

известно, то не трудно найти и общее тормазное усилие всего поезда

$$B_k - \varphi_k \Sigma X = \varphi_k \Sigma \delta H \quad 38a$$

Обычно это усилие представляют в ином виде, а именно полагают

$$\Sigma \delta H = \delta_k 1000 Q',$$

где Q' есть тормазной вес поезда в тоннах, т. е. тот вес его, который передается на оси, снабженные тормазами, а

$$\delta_k = \frac{\Sigma \delta H}{1000 Q'} \quad 42$$

средний коэффициент нажатия колодок. Кроме того, как мы увидим ниже, для вычислений удобнее B_k относить к тонне веса поезда. Такое удельное тормазное усилие

$$b_k = \frac{B_k}{P + Q} = 1000 \varphi_k \frac{Q'}{P + Q} \delta_k,$$

или

$$b_k = 1000 \vartheta \varphi_k, \quad 43$$

где

$$\vartheta = \frac{Q'}{P + Q} \delta_k \quad 44$$

есть отвлеченное число, называемое *тормазным коэффициентом*.

Как видно из формулы 44, тормазной коэффициент, который по существу своему есть не что иное, как отношение суммы сил нажатия колодок во всем поезде к его весу, выражается как произведение двух множителей. Первый из них

$$\frac{Q'}{P + Q}$$

для данного поезда есть величина постоянная, второй же

$$\delta_k = \frac{\Sigma \delta H}{1000 Q'}$$

зависит от нашего произвола, ибо мы можем менять δ_k от 0 до указанных в предыдущем § норм. В товарной службе при ручных тормазах эти колебания δ_k достигаются исключительно за счет тендерного тормазы, ибо для кондукторов есть только два сигнала „тормазить“ и „отпустить тормазы“. При непрерывных

же тормозах, напротив, машинисты реализуют δ_k лишь в исключительных случаях, пользуясь обычно в зависимости от числа тормозов в поезде, т. е. от величины

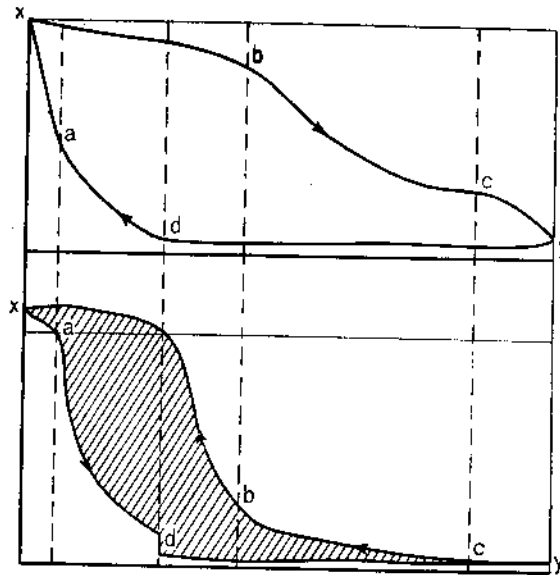
$$\frac{Q}{P+Q},$$

значениями δ между 0,1 и 0,3 наибольшего возможного. Такой способ употребления тормозов нельзя не признать вполне правильным, ибо резкое торможение беспокоит пассажиров и отражается не выгодно и на рельсах и на подвижном составе.

Поэтому при расчетах времен хода пассажирских поездов рекомендуется пользоваться, если это только по профилю представляется возможным, значениями δ около 0,1 δ max. При расчетах же предельных скоростей по тормазам надо пользоваться максимальными значениями δ , ибо они и имеются в запасе именно на случай внезапной остановки.

§ 38. Контропар. Кроме тормозов для регулирования скорости поезда применяется еще, как на судах, контропар, т. е. сообщение паровозу заднего хода при движении трубой вперед и обратно переднего при движении назад ¹⁾. В прежнее время при отсутствии непрерывных тормозов надежной конструкции.

¹⁾ В виду того, что в русской литературе почти нет указаний о тех явлениях, которые имеют место в цилиндрах паровоза при контропаре, позволю



себе несколько остановиться на этом вопросе. При нормальном действии пара индикаторная диаграмма имеет вид, показанный на верхней фигуре, где ab есть

применение контропара было очень распространено, как в товарной, так и в пассажирской службе¹⁾. В настоящее же время с пассажирскими поездами к нему приходится прибегать лишь в совершенно исключительных случаях. В товарной же службе, благодаря слабости наших вагонных тормазов, и поныне к контропару приходится прибегать довольно часто, в силу чего все наши товарные паровозы снабжаются кранами Лешателье для мокрого контропара. Особенное же значение контропар имеет для обслуживания маневровым порядком частных веток с крутыми уклонами, где обеспечение передаваемых составов тормазами и тормозильщиками обходится слишком дорого.

Очевидно, что тормазное усилие, вызываемое контропаром, зависит от положения регулятора и переводного механизма. Иными словами, меняя эти факторы, мы можем менять и силу контропара B_n . В данный же момент нас интересуют главным образом те наибольшие значения B_n , которые можно получить от паровоза. Как и сила тяги, B_n по существу ограничена тремя условиями: размерами цилиндров, сцеплением и размерами котла. Практически, однако, последнее условие для контропара не имеет

выпуск, *bc* расширение, *cd* выпуск, *da* сжатие. Представим себе теперь, что при тех же элементах распределения мы даем контропар, т. е. выполняем диаграмму в обратном порядке (нижняя фигура), впуская пар на нерабочую сторону поршня. При движении поршня от *x* до *a* паровпускной канал сообщен с цилиндром, и потому в нем происходит выпуск. В точке *a* этот выпуск прекращается и до точки *d* цилиндр остается разобщенным, как и на верхней диаграмме, от обоих каналов; благодаря этому то количество пара, которое было в цилиндре в момент *a*, на пути *ad* подвергается расширению. В точке *d* происходит соединение цилиндра с конусом, и давления в них сравниваются; на пути *duc* это сообщение продолжается; на пути *cb* цилиндр разобщен и от регулятора и от конуса. В точке же *d* начинается выпуск пара навстречу движущемуся поршню, как это имеет место при обычной работе в период предварения впуска (*ax* на верхней фиг.). Результатом удара пара о поршень является быстрое повышение его давления, обычно даже выше давления в котле. А так как этот пар повышенного давления выталкивается поршнем обратно в котел, то давление в нем при контропаре тоже обычно начинает повышаться. Это первая отрицательная сторона контропара. Второй следует признать засасывание в цилиндр по пути *dy* из дымовой коробки продуктов горения, повышающих температуру цилиндра и входящего пара (перегрев), что отражается весьма разрушительно на сальниках и золотниках. Для устранения этих явлений Лешателье в 1865 г. предложил при контропаре пускать в цилиндр не пар, а смесь его с водой. При таком „мокроем“ контропаре теплота засасываемых газов, а также теплота, развиваемая при ударе пара о поршень, идут не на перегрев пара, а на осушение его. Иными словами, идея Лешателье, осуществляемая посредством его крана, состоит в том, чтобы парализовать вредное действие освобождающейся при контропаре теплоты за счет скрытой теплоты парообразования.

¹⁾ Couche. Voie, matériel roulant et l'exploitation technique des chemins de fer. III. 1876, стр. 427—489.

значения, ибо он продолжается обычно сравнительно не долго, и потому о недостатке пара для него говорить не приходится.

Сила контропара B_n выражается в зависимости от размеров цилиндров совершенно также, как и сила тяги. Именно для двучилиндрового паровоза некомпанунд

$$B_n = \eta \frac{d^2 l}{D} p_i = \eta \xi \frac{d^2 l}{D} p_k,$$

а вообще

$$B_n = \eta \frac{1}{2D} \sum d^2 l p_i, \quad \dots \quad (45)$$

причем как и при прямом действии пара p_i и ξ уменьшающийся с увеличением скорости¹⁾. По опытам Саксонских дорог в 1870 г.²⁾ при мокром контропаре и 2 оборотах движущих колес в секунду

$$\max \xi \eta = \xi_n \eta_n = 0,6,$$

а по новейшим опытам³⁾ при 4 оборотах

$$\xi_n = 0,4.$$

Эти цифры как будто дают право предложить для $\xi_n \eta_n$ очень простую формулу

$$\xi_n \eta_n = 0,8 - 0,11 n;$$

однако, диаграммы, снятые мной с паровоза 0-4-0 Русского общества, показывают, что благоразумнее считать

$$\xi_n \eta_n = 0,55 - 0,05 n.$$

Формула эта с достаточной точностью применима и для паровозов компанунд, если p_i относить к большому цилиндру, т. е. если считать, что

$$B_n = \xi_n \eta_n \frac{m d^2 l}{2D} p_k, \quad \dots \quad 45a$$

где m число больших цилиндров, а d их диаметр.

Переходя к ограничению B_n по сцеплению, прежде всего отметим, что это ограничение вытекает из тех самых соображений,

¹⁾ Couche. Там же, стр. 451.

²⁾ Heusinger, von Wallderg. Handbuch für specielle Eisenbahntechnik. III. (1875), стр. 774.

³⁾ Leitzmann und von Borries. Theoretisches Lehrbuch des Lokomotivbaues 1911, стр. 415.

как и при тормозах. Там во избежание скольжения должно быть для каждой тормозной оси выполнено условие

$$B \leq \varphi_0 P,$$

а при контропаре для всех движущих осей паровоза —

$$B_n \leq \varphi_0 P_k$$

или, точнее, так как B_n меняется в течение оборота,

$$B_n \leq \psi_n P_k,$$

где

$$\psi_n < \varphi_0.$$

В случае же торможения движущих осей паровоза из принципа сложения сил мы имеем

$$B_k + B_n \leq \psi_n P_k,$$

или, полагая $\psi_n = \psi_k$,

$$B_k + B_n \leq \max F_k \dots \dots \dots 46$$

Иными словами, сумма тормозящих усилий на обода движущих осей паровоза от контропара и тормазов ограничена тем же пределом, как и сила тяги. Осторожнее, однако, во избежание скольжения при плохой погоде, брать при расчетах

$$\psi_n < \psi_k,$$

например около $\frac{1}{2}$.

Интегрирование уравнения движения поезда.

$$\frac{dV}{dt} = \xi \frac{F_k \cdot W_k - B_k}{P + Q},$$
$$\frac{dV}{dt} = \zeta \frac{F_i - W_i - B_k}{P + Q},$$
$$W_i = W_k + W_m, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 47$$
$$\frac{F_k}{P+Q} = f_k,$$

$$F_i \cdot p_{-i} = f_i,$$

$$\frac{W_k}{P+Q} = w_k := \frac{w_0 P - w_0'' Q}{P+Q} + i_k + k + e,$$

$$\frac{W_i}{P+Q} = w_i = \frac{(w_k + w_0') P + w_0'' Q}{P+Q} + i_k + k + e,$$

$$\frac{dV}{dt} = \zeta (f_k - w_k - 1000 \varphi_k \vartheta), \quad \dots \quad II'_k$$

или

$$\frac{dV}{dt} = \xi(f_i - w_i - 1000 \varphi_k \vartheta), \quad \text{II}$$

судя по тому хотим ли мы иметь дело с касательной силой тяги, или с индикаторной. В общем же виде можно написать, что

$$\frac{dV}{dt} = \xi(f - w - 1000 \varphi_k \vartheta), \quad \text{II'}$$

помня только, что f и w надо брать всегда с одними индексами.

Этой последней формулой уравнения движения поезда мы и будем пользоваться в дальнейшем изложении. При этом нужно помнить, что

$$w = w_0 + i + k + e, \quad \text{48}$$

где w_0 выражает сопротивление на прямом и горизонтальном пути, i — добавочное сопротивление от под'ема, k от кривой, e — от погоды. Сопротивление от под'ема и кривой всегда соединяют вместе, называя виртуальным, расчетным или приведенным под'емом величину

$$i_k = i + k \quad \text{49}$$

Дополнительное же сопротивление от погоды, как было указано, или вводят в w_0 или присоединяют к i_k называя в этом случае

$$i_k = i + k + e \quad \text{49a}$$

В обоих, однако, случаях

$$w = w_0 + i_k, \quad \text{50}$$

как это мы и будем принимать в дальнейшем.

§ 40. Исследование уравнения поезда при равномерном его движении. Так как f , w и φ_k суть функции скорости, а f , ϑ и отчасти w кроме того и веса поезда Q , то мы в праве уравнение II переписать еще под видом

$$\frac{dV}{dt} = f(V, Q) \quad \text{IIo}$$

Предположим теперь, что поезд движется равномерно со скоростью V . В таком случае

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

и, следовательно,

$$f(V, Q) = 0 \quad (*)$$

Такое уравнение равномерного движения поезда дает возможность решить две задачи: 1) по заданному составу найти скорость с которой поезд пойдет равномерно по данному под'ему, и 2) по заданной скорости и под'ему найти состав поезда.

Аналитическое решение второй задачи всегда возможно; аналитическое же решение первой — только в исключительных случаях. В самом деле, если мы возьмем даже наиболее простые формулы

$$N = A' + B \sqrt{V}$$

$$W = C' + D' V + E' V^2,$$

то уравнение (*) примет вид

$$F = \frac{270 N}{V} = \frac{A + B \sqrt{V}}{V} = (P + Q) (w_0 + i_k) = \\ = C + D V + E V^2,$$

или

$$A + B \sqrt{V} = C V + D V^2 + E V^3,$$

иными словами, нам придется иметь дело с уравнением шестой степени, которое, как известно, в общем случае решить нельзя.

Между тем графически уравнение

$$f(V, Q) = 0$$

решается очень просто при всяком виде зависимости

$$F = \varphi(V).$$

Для этого наносим на один чертеж кривые f и w_0 , т. е. кривые удельных силы тяги и сопротивления на площадке, они будут иметь вид, показанный на фиг. 39, прибавляя теперь к ординатам кривой w_0 отрезки i_k , мы получим кривую

$$w = w_0 + i_k.$$

Очевидно там, где эта кривая пересекается с кривой f ,

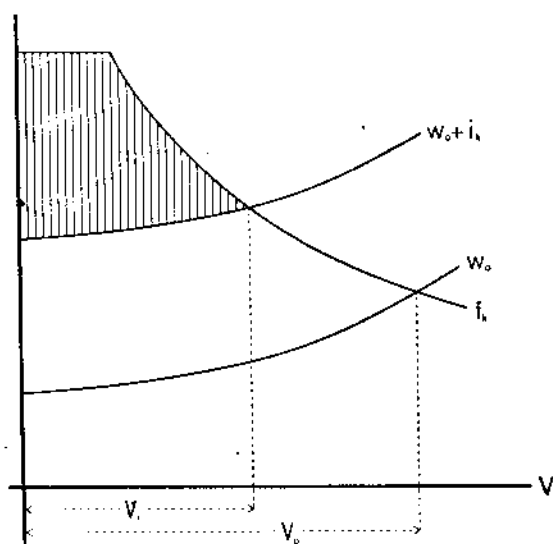
$$\frac{dV}{dt} = f(V, Q) = \xi(f - w) = 0,$$

т. е. пересечение этих кривых дает нам прямо искомую V .

Может быть, однако, такой случай, когда эти кривые не пересекутся, т. е., когда корни уравнения

$$f(V, Q) = 0$$

будут мнимыми. Это показывает, что поезд при данных условиях не имеет равномерной скорости V , т. е., что он должен остано-



Фиг. 39.

виться. Такой случай будет иметь место всегда, когда

$$f < w + 1000 \varphi_k \vartheta.$$

Для примера разберем случай торможения на уклоне при закрытом регуляторе. В этом случае (фиг. 40)

$$f_i = 0,$$

и

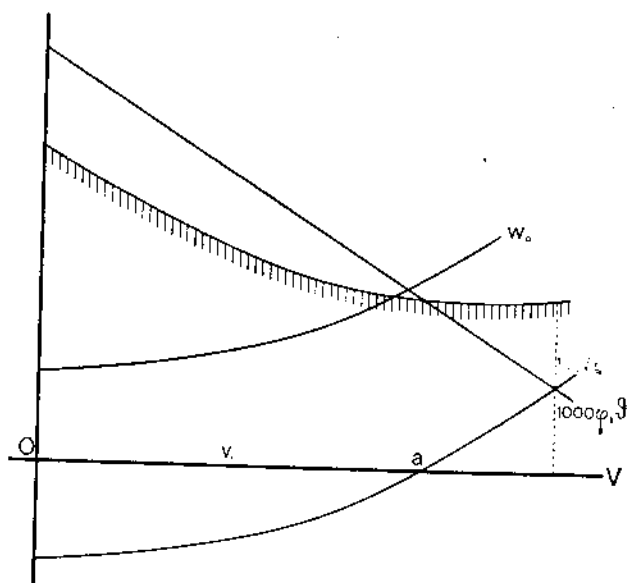
$$i_k < 0;$$

поэтому кривая f_i сольется с осью V , а кривая

$$w = w_0 + i_k + w'_m$$

расположится ниже w_0 . Поэтому, если поезд предоставить самому себе, то он будет катиться вниз с равномерной скоростью $V_i = 0a$. Если же мы введем действие тормоза, то сопротивление возрастет с w_i до $w_i + 1000 \vartheta \varphi_k$, выражаемого заштрихованной кривой. Эта кривая не пересекается с $f_i = 0$, и, следовательно, поезд будет двигаться замедленно, пока не остановится.

§ 41. Исследование уравнения поезда при неравномерном его движении. Выше мы видели, что, исходя из предположения равномерного движения, по заданной скорости и под'ему можно определить состав, и обратно — по заданному составу и под'ему — скорость равномерного движения. Этого, однако, недостаточно для нужд повседневной практики, которая выставляет ряд задач, совершенно исключающих возможность применения гипотезы равномерности движения. Сюда относятся все задачи на тормазы и на преодоление под'емов за счет живой силы поезда. Кроме того, и самая распространенная задача, определение времени хода по перегону заданного профиля, может быть решена при помощи этой гипотезы лишь очень грубо, ибо предположение, что поезд мгновенно меняет скорость при переходе на участок другого профиля, очень далеко от истины. В действительности, как в том легко убедиться из любой ленты Гауссгелтера, поезд движется равномерно лишь в исключительных случаях. Обычно же его движение, или замедленное, или ускоренное.



Фиг. 40.

Введение в наши расчеты неравномерного движения сводит их к интегрированию уравнения

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = f(Q, V), \dots \dots \dots \text{По}$$

приводящегося, как мы видели на стр. 14—15, при первом инте-

рировании к квадратурам

$$t - t_0 = \int_{v_0}^v \frac{dv}{f(Q, v)} \quad 56$$

$$s - s_0 = \int_{v_0}^v \frac{v dv}{f(Q, v)} \quad 76$$

которые можно представить под видом

$$v = \varphi(t) \quad 5a$$

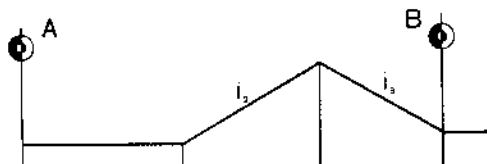
$$v = \psi(s) \quad 7a$$

и которые при втором интегрировании дают зависимость

$$t = \chi(s) \quad 6a$$

Раньше, однако, чем перейти к приемам выполнения этих квадратур, остановимся несколько на общем исследовании уравнения IIо, не решая пока его.

Предположим, что на ст. А стоит поезд, готовый к отправлению по участку АВ, профиль которого представлен на фиг. 41. В момент отправления машинист может реализовать силу тяги,



Фиг. 41.

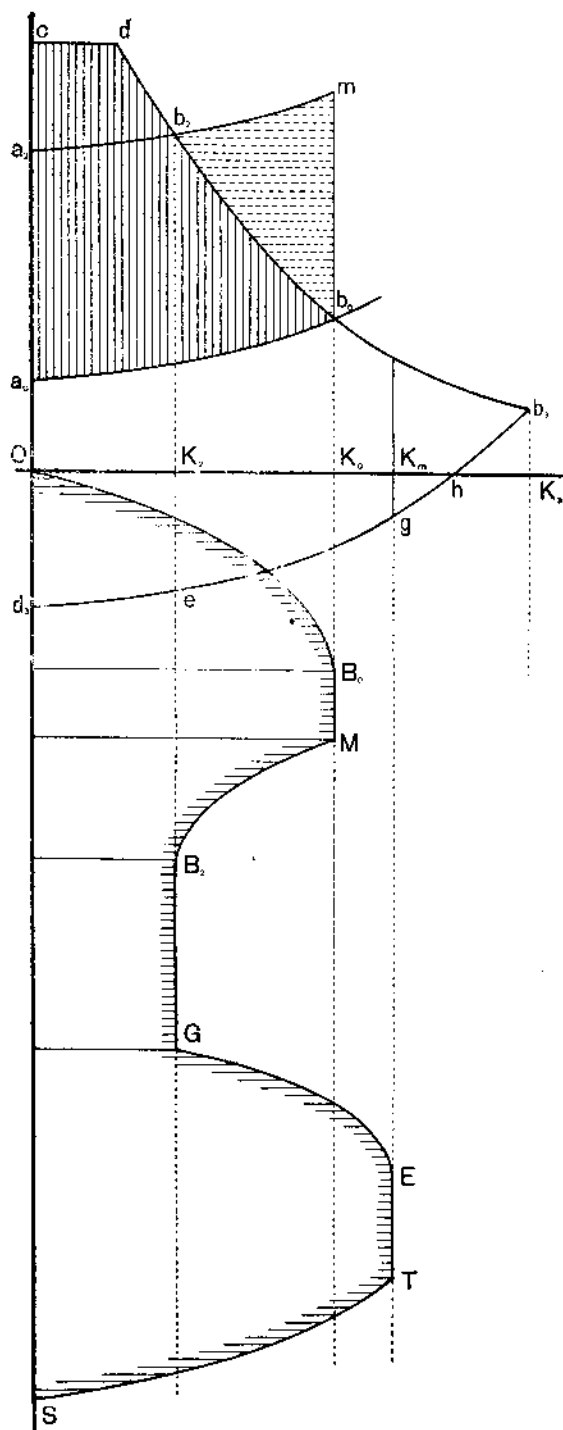
равную $0s$ (фиг. 42), сопротивление же будет равно $0a_0$; поэтому, согласно уравнения

$$\frac{dV}{dt} = \zeta (f - w_0 - i_k),$$

или

$$f - (w_0 + i_k) = \frac{1}{\zeta} \frac{dV}{dt},$$

отрезок sa_0 выразит нам в некотором масштабе ускорение поезда в момент отправления. Вообще же, пока поезд идет по площадке ординаты вертикально заштрихованной площади a_0cdb_0 выражают значения ускорения, соответствующие той или иной скорости. А так как эти ординаты убывают с увеличением скорости, то, значит,



Фиг. 42.

кривая скоростей будет иметь вид OB_0 ; когда же скорость достигает значения $OK_0 = V_0$, то ускорение делается равным нулю, и дальше поезд пойдет равномерно с этой скоростью, что на кривой скоростей выразится прямой B_0M . Далее, если точка M соответствует моменту входа на подъем, то ей соответствует замедление mb_0 , ибо при входе на подъем i_2 со скоростью V_0 сила тяги равна K_0b_0 , а сопротивление K_0m . Под влиянием этого замедления скорость начнет падать, но вместе с ней начнут падать и значения замедления, выражаемые ординатами площади b_0mb_2 . Когда же скорость упадет до $OK_2 = V_2$, то замедление делается равным нулю, и далее поезд пойдет равномерно с этой скоростью. Пусть это равномерное движение продолжается до точки G , соответствующей моменту вступления поезда на уклон $-i_3$. В этот момент поезд получит ускорение b_2e и начнет двигаться ускоренно, пока его скорость не достигнет величины $OK_3 = V_3$. Предположим, что эта скорость больше предельной допустимой скорости $V_m = OK_m$. Если, однако, по достижении этой последней скорости, машинист закроет регулятор, то поезд будет все-таки двигаться ускоренно, пока не достигнет скорости $V_n = Oh$. Поэтому для того, чтобы двигаться по уклону с равномерной скоростью $V_m = OK_m$, необходимо сообщить поезду дополнительное сопротивление K_mg , т. е. приложить к нему силу торможения, равную этой величине. Для того же, чтобы остановить поезд, надо приложить силу торможения во много раз большую.

§ 42. Допущения, необходимые для аналитического интегрирования. На стр. 14—15 и 108—109 было уже выяснено, что все тяговые расчеты, относящиеся к случаю неравномерного движения, сводятся к выполнению квадратур

$$t - t_0 = \int_{V_0}^V \frac{dV}{f(Q, V)} \quad \dots \dots \dots 56$$

$$s - s_0 = \int_{V_0}^V \frac{V dV}{f(Q, V)} \quad \dots \dots \dots 76$$

чем мы сейчас и займемся.

Для возможности взять эти интегралы необходимо прежде всего знать вид функции

$$f(Q, V) = \zeta (f_* - w_0 - i_k - 1000 \varphi_k \vartheta).$$

Удельное сопротивление w_0 в самом общем случае может быть представлено трехчленом скорости

$$w_0 = A_0 V^2 + B_0 V + C_0,$$

i_k есть величина постоянная, θ то же; что же касается величины φ_k , то на стр. 92 было указано, что с достаточной для практики точностью ее можно выражать линейною формулой

$$\varphi_k = C_k + B_k V.$$

Таким образом полное сопротивление

$$w_0 + i_k + 1000 \theta \varphi_k = A V^2 + B V + C,$$

причем корни уравнения

$$A V^2 + B V + C = 0$$

при $i_k > 0$ заведомо мнимы, а при $i_k < 0$ могут быть и мнимыми, и действительными.

Величина же f , как было указано в гл. II, не представляет из себя определенной функции от V , как это необходимо для интегрируемости нашего уравнения, а в общем случае выражается ломаной кривой, изображенной на фиг. 3. Чтобы устранить это препятствие, Романов¹⁾, а после него Фламанн²⁾, Уберти и Стевар предложили заменить истинное очертание силы тяги параболой вида

$$f = C_f - B_f V - A_f V^2,$$

как показано на фиг. 43 пунктиром из одних тире. Такая замена обращает

$$f(Q, V)$$

в трехчлен скорости

$$a V^2 + b V + c,$$

благодаря чему квадратуры

$$t - t_0 = \int_{V_0}^V \frac{dV}{f(Q, V)} = \int_{V_0}^V \frac{dV}{a V^2 + b V + c} \quad \dots \dots \dots 5B$$

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \int_{V_0}^V \frac{V dV}{f(Q, V)} = \int_{V_0}^V \frac{V dV}{a V^2 + b V + c} \quad \dots \dots \dots 7B$$

берутся в конечном виде. Позволительно, однако, думать, что

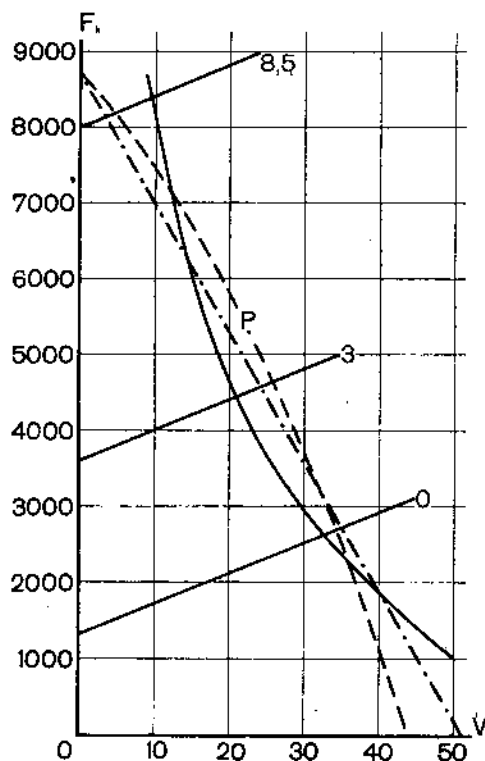
¹⁾ Романов. Паровозы. (1900), стр. 393. (Тоже и в I литограф. изд.)

²⁾ Flamache, Huberti et Stéwart. Traité d'exploitation des chemins de fer. IV (1899), стр. 317.

эта интегрируемость достигается слишком дорогой ценой. В самом деле, из фиг. 43, относящейся к паровозу 0-4-0 нормального типа $\varepsilon = 25$ видно, что замена опытной кривой параболой

$$F_k = 8700 - 100V - 2,2V^2$$

уменьшает скорости, с которыми поезд стремится двигаться равномерно по под'емам, близким к предельным, почти вдвое. Так,



Фиг. 43.

для поезда весом 700 тонн на $i_k = 8,5$ (прямая 8,5) опытная кривая дает $V = 9\frac{1}{2}$, а парабола $V = 5$ km/h. Поэтому при такой замене времени прохождения перегонов, где $8,5\text{‰}$ под'емы являются преобладающими, могут получиться при расчете по парболе ‰ на 80 больше действительных, что уже совершенно не допустимо. Еще худшие результаты для таких перегонов дает замена опытной кривой прямой

$$F_k = 8700 - 170V,$$

которая, вообще говоря, подходит к ней лучше параболы.

Еще ранее Романова, Петров¹⁾ и Ераков²⁾ предложили заменять разность

$$F_k - W_0,$$

прямой, что делает

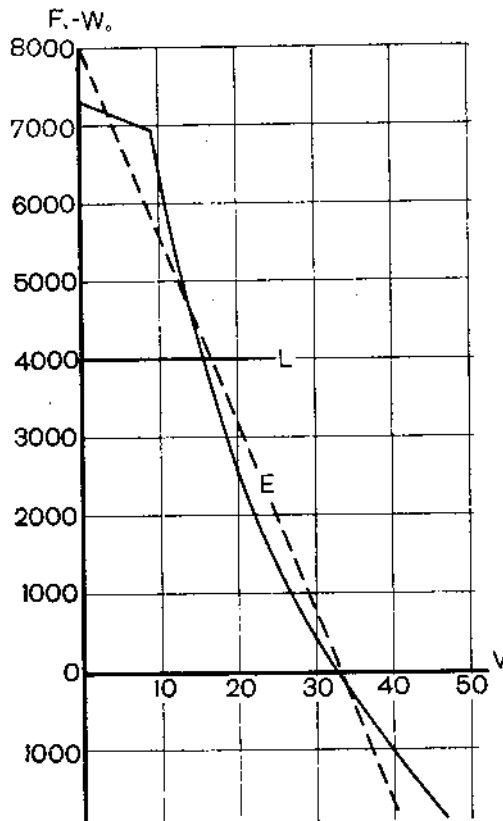
$$f(Q, V) = bV + c.$$

и, следовательно, приводит интегралы 5б и 7б к виду

$$t - t_0 = \int_{v_0}^v \frac{dV}{bV + c} \dots \dots \dots 5г$$

$$s - s_0 = \int_{v_0}^v \frac{V dV}{bV + c} \dots \dots \dots 7г$$

Эти интегралы берутся конечно значительно легче 5в и 7в, а с



Фиг. 44.

¹⁾ Петров. Сопротивление поезда на железной дороге. 1889, стр. 339.

²⁾ Ераков. Сборник статей и записок. 1889, стр. 199.

другой стороны, как показывает фигура 44, относящаяся, как и фиг. 43, к нормальному паровозу 0—4—0, при $\varepsilon = 25$ такое допущение даже несколько ближе к действительности, чем допущение Романова.

Совершенно иначе обстоит дело с позднейшим предложением Лакнера¹⁾, заменять, как это показано на фиг. 44, разность $F_k - W_0$ прямой L, иными словами Лакнер считает

$$F(Q, V) = C,$$

т. е. сводит движение поезда к равномерно ускоренному или равномерно замедленному. Подобное допущение настолько далеко от истины, что можно лишь удивляться, почему статью Лакнера сочли нужным переводить на русский язык.

Все эти замечания справедливы только в том случае, если такая замена совершается для интервала скоростей от 0 до max. Если же

$$F(Q, V)$$

заменять наклонными или даже горизонтальными прямыми в сравнительно тесных пределах V , то это вполне допустимо.

Надо впрочем оговориться, что при расчетах по отсечкам (см. стр. 47—48) опытные кривые $F_k = \varphi(q, \varepsilon, V)$ заменяются очень точно параболой вида

$$F_k = C_f - B_f V - A_f V^2,$$

или даже прямыми

$$f_k = C_f - B_f V.$$

Аналитическое же интегрирование уравнения движения поезда при закрытом регуляторе и вовсе не требует каких-либо допущений, но зато оно весьма усложняется наличием в выражении для W'_m члена с кубом скорости.

§ 43. Выполнение аналитического интегрирования. Если считать, что

$$F(Q, V) = aV^2 + bV + c$$

то интеграл 5 приводится, как мы видели, к виду

$$t - t_0 = \int_{V_0}^V \frac{dV}{aV^2 + bV + c} \quad 5в$$

Интеграл этот, как известно, берется различно в зависимости от

¹⁾ Organ. 1899, стр. 209.

того, будут ли корни уравнения

$$aV^2 + bV + c = 0$$

вещественны или мнимы. В первом случае, т. е. когда

$$m^2 = b^2 - 4ac > 0$$

подстановка

$$aV + \frac{b}{2} = \frac{z}{2} m$$

дает

$$t - t_0 = \frac{2}{m} \int_{V_0}^V \frac{dz}{z^2 - 1}$$

или

$$t - t_0 = \frac{1}{m} \lg_e \frac{\frac{2aV+b-m}{2aV_0+b-m}}{\frac{2aV+b+m}{2aV_0+b+m}}, \quad \dots \quad 5к$$

где $\lg_e$ есть знак гиперболического логарифма. Во втором же случае, т. е. когда

$$m^2 = b^2 - 4ac < 0,$$

подстановка

$$aV + \frac{b}{2} = \frac{z}{2} m \sqrt{-1}$$

дает

$$t - t_0 = \frac{2}{m\sqrt{-1}} \int_{V_0}^V \frac{dz}{1 + z^2},$$

или

$$t - t_0 = \frac{2}{m\sqrt{-1}} \left[\arctg \frac{2aV+b}{m\sqrt{-1}} - \arctg \frac{2aV_0+b}{m\sqrt{-1}} \right] \quad \dots \quad 5м$$

Что же касается интеграла

$$s - s_0 = \int_{V_0}^V \frac{VdV}{aV^2 + bV + c} \quad \dots \quad 7$$

то он легко берется по частям, давая, как при вещественных, так и при мнимых корнях

$$s - s_0 = \frac{b}{2a} (t - t_0) + \frac{1}{2a} \lg_e \frac{aV^2 + bV + c}{aV_0^2 + bV_0 + c} \quad \dots \quad 7к$$

При вещественных корнях оба эти интеграла можно взять и другим способом, более удобным для практических применений. Как известно,

$$a V^2 + b V + c (V - V') (V - V''),$$

где V' и V'' суть корни этого уравнения. Поэтому, разлагая дроби

$$\frac{1}{a V^2 + b V + c}$$

и

$$\frac{V}{a V^2 + b V + c}$$

на простейшие, мы имеем

$$t - t_0 = \frac{1}{V' - V''} \left[\int_{V_0}^V \frac{dV}{V - V'} - \int_{V_0}^V \frac{dV}{V - V''} \right],$$

или замечая, что

$$V' - V'' = 2m,$$

и называя

$$\frac{b - m}{2a} = k,$$

а

$$\frac{b + m}{2a} = h,$$

$$t - t_0 = \frac{1}{m} \lg_e \frac{V + h}{V_0 + h} - \frac{1}{m} \lg_e \frac{V + k}{V_0 + k} \quad \dots \quad 5д$$

Таким же путем для интеграла 7 можно получить

$$s - s_0 = \frac{h}{m} \lg_e \frac{V + h}{V_0 + h} + \frac{k}{m} \lg_e \frac{V + k}{V_0 + k} \quad \dots \quad 7д$$

Преимущество этих формул перед 5в и 7в состоит в том, что, благодаря однородности их конструкции, совместное пользование ими значительно облегчается.

Тем не менее нельзя не признать, что как формулы 5в, 5м и 7в, так и формулы 5д и 7д вообще очень неудобны для практического применения, так как операции с Неперовыми логарифмами и арктангенсами требуют много времени и особенного внимания. Еще более к сложным формулам приводит нас второе интегрирование уравнения движения поезда, т. е. решение уравнения 5 относительно

$$V = \frac{ds}{dt}$$

и интегрирование его. Для вещественных корней мы тогда получаем

$$s - s_0 = -\frac{b + m}{2a}(t - t_0) - \frac{1}{a} \lg_e \frac{\frac{2aV_0 + b - m}{2aV_0 + b + m} e^{mt} - 1}{\frac{2aV_0 + b - m}{2aV_0 + b + m} e^{mt_0} - 1} \quad . \quad . \quad 6к$$

а для мнимых — формулу с арктангенсами под знаком секанса, которую мы не приводим здесь потому, что она не имеет совершенно никакого применения.

Сложность приведенных выше формул и весьма малая их надежность для случая

$$F_l > 0$$

заставляет искать других более простых приемов интегрирования уравнения поезда. Самым естественным упрощением в этом направлении является предположение, что

$$a = 0,$$

т. е. что $f(Q, V)$ выражается не трехчленом, а двухчленом скорости. Такое упрощение, как мы видели выше, в некоторых случаях даже увеличивает точность расчетов и значительно упрощает формулы 5, 6 и 7, которые в этом случае принимают вид

$$t - t_0 = -\frac{1}{b} \lg_e \frac{bV + c}{bV_0 + c} \quad . \quad . \quad . \quad 5л$$

$$s - s_0 = \frac{V - V_0}{b} - \frac{c}{b}(t - t_0) \quad . \quad . \quad . \quad 7л$$

$$s - s_0 = c(t - t_0) - e^{-b(u-t)} + e^{-b(u-t_0)} \quad . \quad . \quad . \quad 6л$$

где

$$m = t_0 - \frac{1}{b} \lg_e (bV_0 + c).$$

§ 44. Преимущества графического интегрирования. Формулы, приведенные в предыдущем §, вообще говоря, очень громоздки и неудобны для практического применения, так как помимо большой затраты времени, чем формулы сложнее, тем больше вероятность арифметических ошибок. С другой стороны, приходится признать, что, не смотря на такую сложность, для общего случая, когда

$$F_l > 0,$$

они дают мало надежные результаты, ибо для возможности их

применения в пределах от $V=0$ до $V=V_{max}$ приходится делать такие допущения о зависимости

$$F = \varphi(V),$$

которые иногда идут совершенно в разрез с действительностью. Если же применять их в узких пределах V , то расчет еще усложнится и вероятность ошибок еще возрастет.

Уж если надо заменять кривую $F = \Pi$ ломанной или ступенчатой, то проще перейти к графическим приемам расчета, которые помимо всего прочего гораздо нагляднее, и потому при них всякая ошибка бросается скорее в глаза.

В виду всего сказанного представляется совершенно непонятным, почему эти приемы, насчитывающие более пятнадцати лет своего существования, и получившие столь широкое распространение на электрических трамваях, в железнодорожной практике почти не применяются. Особенно же непонятно игнорирование их на русских дорогах, не смотря на то, что разработка их в значительной степени обязана русским техникам¹⁾.

Способов графического интегрирования уравнения движения поезда было предложено очень много, но здесь подробно будут разобраны только способы Дедуи и Липеца, наиболее удобные для практического применения. Хотя с другой стороны нельзя не отдать должного остроумию и изяществу способа Дубелира и графоаналитических приемов Чечотта, о которых будет тоже сказано несколько слов.

§ 45. **Идея Дедуи.** В 1898 году Дедуи²⁾ (Desdouits) предложил на основании диаграммы f и w , изображенной на фиг. 45

¹⁾ Ломоносов. Конспект курса паровозов (литограф. изд.) Киев. 1903.
Липец. Упрощенный способ графического расчета хода поездов. Киев. 1907.

Турчанинов. Пояснительная записка к проекту дачного паровоза для Х.-Н. ж. д. Киев. 1907.

Дубелир. Исследование движения вагонов электрических железных дорог. Киев. 1908.

Ломоносов. Тяговые расчеты и приложение к ним графических методов. СПб. 1912.

Вяземский. Расчет наибольшего веса товарного поезда, количества времени и воды для пробега поездов различных составов. СПб. 1912.

Лебедев. К вопросу об определении времени хода. Журнал М. П. С. 1913. Книга II.

Липец. Упрощенные приемы расчета времени хода поездов. СПб. 1913.

²⁾ Revue Générale. 1898. II. S., стр. 397.

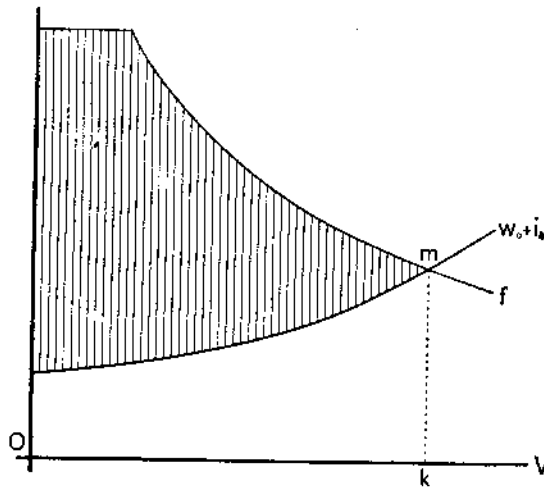
графически строить кривую

$$V = \varphi(t),$$

т. е. графически брать интеграл

$$t = \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{f(V, Q)}.$$

Его предложение основано на том факте, что угол α , (см. фиг. 46)



Фиг. 45.

составляемый касательной к кривой

$$V = \varphi(t)$$

в любой ее точке с положительным направлением оси времен, равен арктангенсу производной от V по t , иными словами,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = tga.$$

С другой стороны

$$\frac{dV}{dt} = \xi [t - (w_0 + i_k + 1000 \partial \varphi_k)],$$

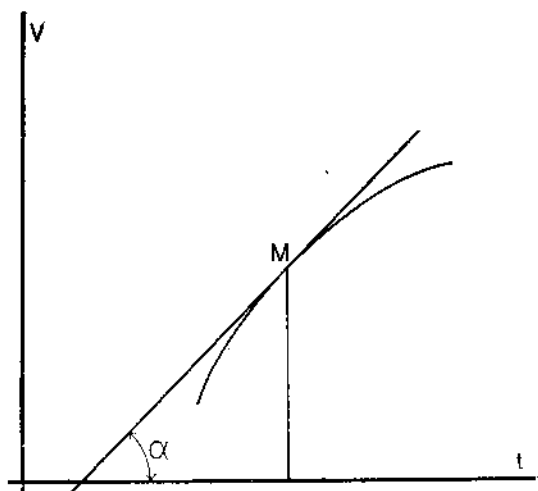
а потому

$$f = (w_0 + i_k + 1000 \partial \varphi_k) \cdot \frac{1}{\xi} tga, \quad 51$$

т. е. тангенсы углов, образуемых касательными к кривой

$$V = \varphi(t),$$

с осью времени пропорциональны ординатам той площади, которая на фиг. 45 выделена штриховкой.



Фиг. 46.

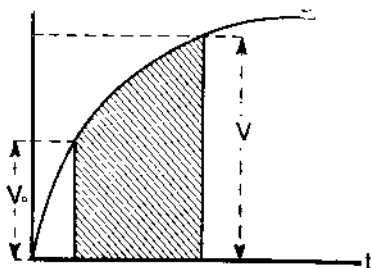
Что же касается второго интеграла уравнения движения поезда, т. е. кривой

$$s = \chi(t), \quad \dots \quad 6a$$

то ее из кривой

$$\Gamma = \varphi(t) \quad \dots \quad 5a$$

Дедуи предлагал получать на основании того соображения, что заштрихованная площадь фиг. 47 равна



Фиг. 47.

$$\int_{V_0}^V \Gamma dt = \int_{V_0}^V \frac{ds}{dt} dt = s - s_0.$$

Как осуществить на основании указанных зависимостей построение кривых

$$\Gamma = \varphi(t) \quad \dots \quad 5a$$

и

$$s = \chi(t), \quad \dots \quad 6a$$

сам Дедуи не показал. Другими же исследователями было предложено несколько таких построений, из числа коих я приведу здесь два, предложенных мной, и применявшихся с большим успехом при работах со студентами Варшавского и Киевского Политехнических Институтов (1901—1907 гг.).

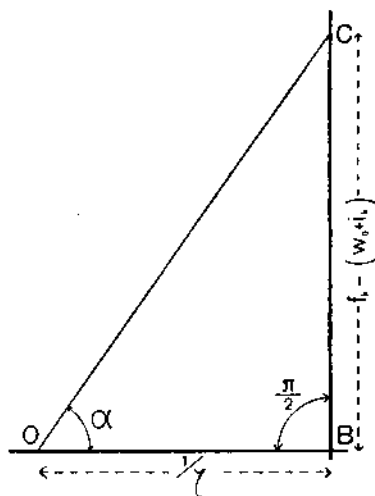
§ 46. Первый прием Дедуи-Ломоносова. Этот прием напоминающий построение веревочного многоугольника в графической статике, основан на построении равенства

$$f - (w_0 + i_k) = \frac{1}{\zeta} \operatorname{tg} \alpha$$

или при действии тормазов

$$f - (w_0 + i_k + 1000 \vartheta \varphi_k) = \frac{1}{\zeta} \operatorname{tg} \alpha,$$

способом указанным на фиг. 48.



Фиг. 48.

Для того, чтобы это построение применить ко всей диаграмме, изображенной на фиг. 45, разобьем площадь, там заштрихованную, на произвольное число частей и предположим, что в пределах каждой из них разность

$$f - (w_0 + i_k) = f - w$$

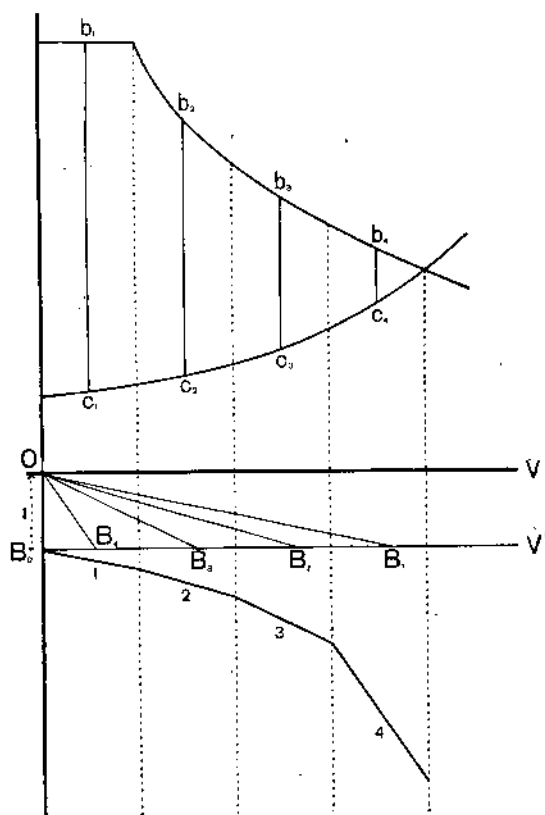
остается постоянной и равной средней ординате. (Эти последние на фиг. 49 отмечены сплошными линиями.) В таком предположении для каждого из наших интервалов скорости, угол α будет постоянным. Значения же его найдутся очень просто.

если на фиг. 49 вниз от оси V мы отложим

$$OB_0 = \frac{1}{\xi},$$

а от B_0 отрезки

$$\overline{B_1 B_0}, \overline{B_2 B_0}, \dots$$



Фиг. 49.

равные отрезкам

$$\overline{b_1 c_1}, \overline{b_2 c_2}, \dots$$

ибо тогда для любого интервала

$$\angle BOB_0 = \alpha.$$

Переносим, теперь, для большей ясности чертежа, начало координат в точку B_0 , и проводим отсюда прямую 1 параллельно лучу OB_1 , мы получим зависимость

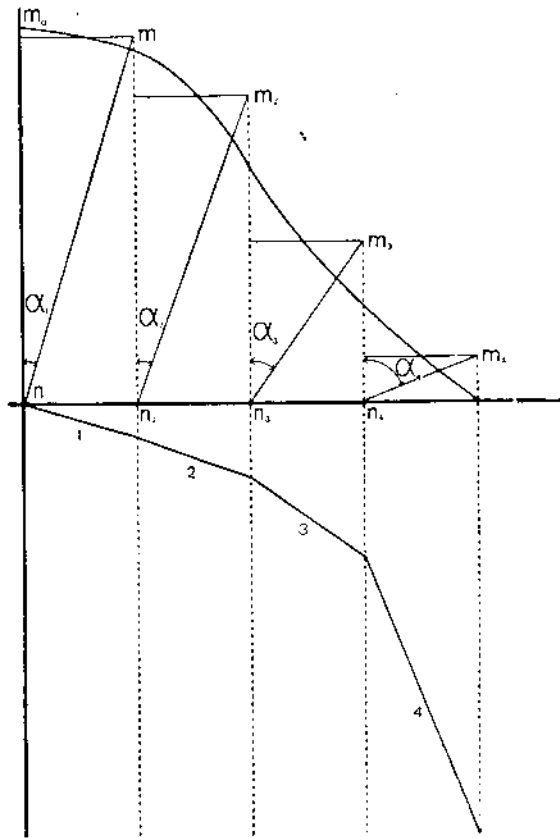
$$V = \varphi(t),$$

существующую при наших предположениях в пределах первого интервала скорости. Проводя же далее прямые 2, 3 . . . параллельно OB_2 , OB_3 . . . , мы получим ломаную линию, которая при бесконечном увеличении числа интервалов сольется с истинной кривой

$$\Gamma = \varphi(t).$$

Для практических целей, однако, нет надобности слишком увеличивать число интервалов Γ , ибо как показывает фиг. 49, при малых скоростях углы α очень мало отличаются друг от друга. Отсюда следует, что, желая сохранить точность построения постоянной для всех Γ , интервалы ее нужно уменьшать с ее увеличением. Поэтому тот факт, что разбираемое построение не требует равенства интервалов скорости, следует отнести к числу его достоинств.

§ 47. Второй прием Дедуи-Ломоносова с поправкой Лебедева. Этот способ еще проще в смысле построения, но как раз



Фиг. 50.

лишен последнего достоинства, ибо в основу его положено равенство интервалов V . Сущность этого способа ясна из фиг. 50, на которую нанесены не f и $w_0 + i_k$ отдельно, а сразу их разность. Очевидно, что, считая эту разность в пределах каждого интервала постоянной, мы найдем

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{f - (w_0 + i_k)}{\Delta} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\Delta \xi} \frac{dV}{dt},$$

где Δ есть величина интервала $p_1 p_2 = p_2 p_3 = \dots$. Иными словами, если масштаб времен изменить в отношении $1 : \Delta \xi$, то углы α будут равны углам, образуемым касательными к кривой

$$V = \varphi(t)$$

с осью времен. Поэтому, для получения этой кривой, достаточно провести прямые 1, 2, 3... перпендикулярно $p_1 m_1 p_2 m_2, p_3 m_3, \dots$

Практические преимущества этого приема при массовых расчетах вызвали естественное желание распространить его и на случай неравных интервалов. Задача эта была разрешена Лебедевым, предложившим, как показано на фиг. 51, проводить лучи не в конец интервала, а в конец отрезков km произвольной, но равной длины. С этой поправкой рассматриваемый прием является наиболее удобным для получения кривой

$$V = \varphi(t) \quad 5a$$

§ 48. Второй интеграл при способе Дедуи. Выше было уже выяснено, что для практических целей недостаточно получить первый интеграл уравнения движения поезда

$$V = \frac{ds}{dt} = \varphi(t), \quad 5a$$

а надо иметь и второй

$$s = \int \varphi(t) dt + C = \chi(t) \quad 6a$$

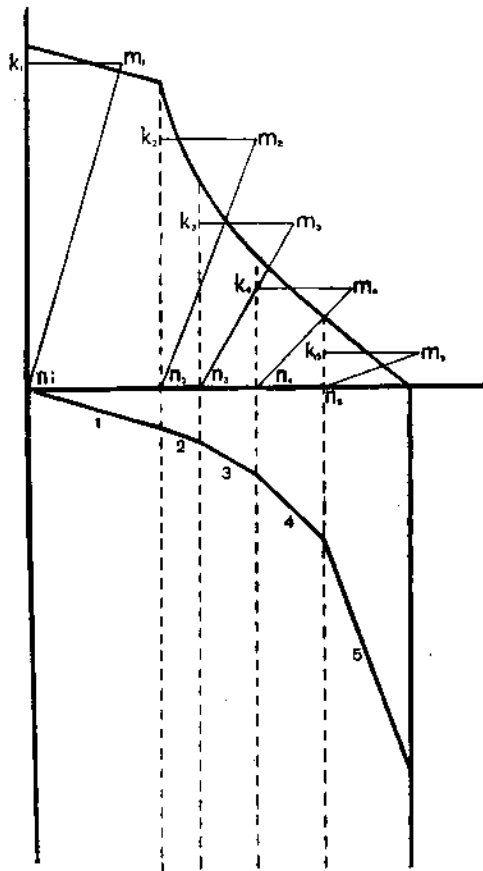
Этот второй интеграл, как было указано на стр. 121, Дедуи предлагал находить, исходя из условия, что площадь диаграммы

$$V = \varphi(t)$$

между двумя ординатами

$$\int_{v_0}^{v_1} v dt = s - s_0.$$

Поэтому, разделив время на ряд произвольных интервалов,



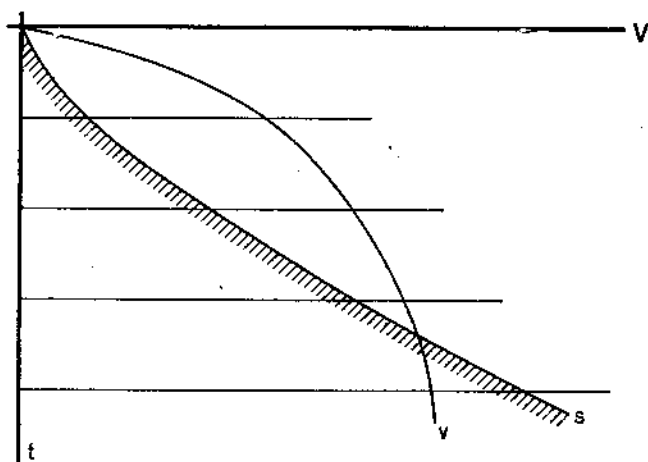
Фиг. 51.

мы для каждого из них легко можем помощью планиметра найти величину перемещения s . Откладывая же затем эти величины в виде ординат, как показано на фиг. 52, мы получим кривую

$$s = \chi(t) \dots \dots \dots 6a$$

Сверх того эту кривую можно получить совершенно тем же способом, как из кривой

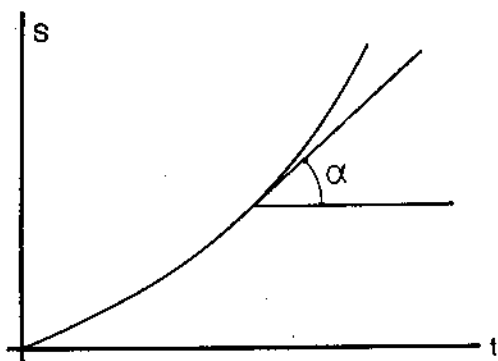
$$\frac{dV}{dt} = f(V)$$



Фиг. 52.

мы получили кривую

$$V = \frac{ds}{dt} = \varphi(t).$$



Фиг. 53.

В самом деле, (см. фиг. 53) угол α , образуемый касательной к кривой

$$s = \chi(t), \quad \dots \quad \text{ба}$$

в любой ее точке равен

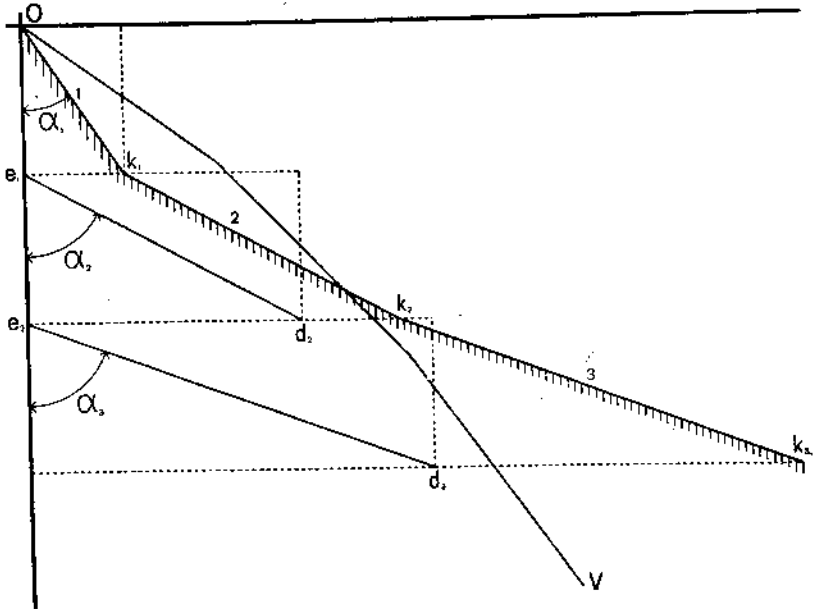
$$\arctg \frac{ds}{dt} = \arctg V.$$

Поэтому, разделив t на интервалы, равные единице, и считая, что

в их пределах V постоянно, мы найдем эти углы, как пока-

зано на фиг. 54; проводя же дальше $k_1 k_2 \parallel e_1 d_2$, $k_2 k_3 \parallel e_2 d_3$ и т. д., мы построим кривую

$$s = \chi(t). \quad \dots \dots \dots 6a$$



Фиг. 54.

§ 49. Определение масштабов при способе Дедуи. При всех указанных выше построениях, как вообще при всяких графических приемах, весьма важную роль играет выбор масштабов и правильное их применение.

Очевидно, что, начиная оперировать с диаграммой

$$f - w = f(V),$$

мы можем задаться любыми масштабами для ее абсцисс и ординат. Но на построенных по ней диаграммах (фиг. 55)

$$V = \varphi(t) \quad \dots \dots \dots 5a$$

и

$$s = \chi(t) \quad \dots \dots \dots 6a$$

масштабы t и s получатся уже сами собой. Поэтому для возможности пользоваться этими построениями необходимо по масштабам V и $f - w$ уметь определять масштаб t и s . Этим сейчас мы и займемся.

При способе Дедуи-Лебедева в пределах одного интервала времени

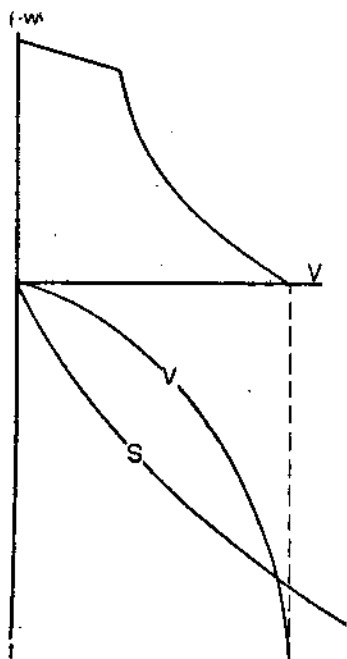
$$f - w = \text{пост} = e;$$

поэтому в этих пределах диаграмма

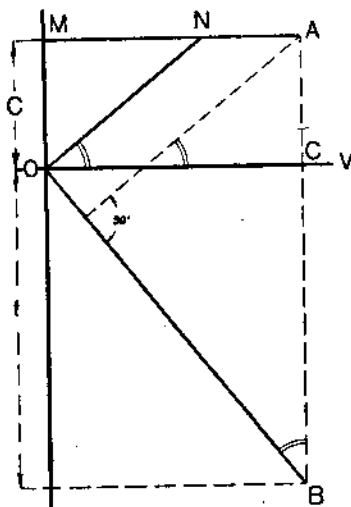
$$f - w$$

имеет вид, показанный на фиг. 56, и кривая

$$V = \varphi(t)$$



Фиг. 55.



Фиг. 56.

обращается в прямую **OB**. Пусть на этой фигуре с отмечено в масштабе $1 \text{ kgf/t} = k \text{ m/m}$, скорости в масштабе $1 \text{ km/h} = m \text{ m/m}$, а произвольная длина **MN** (см. фиг. 51) равна $A \text{ m/m}$. Тогда

$$OC = mV [\text{m/m}],$$

$$AC = ke [\text{m/m}],$$

$$DC^1) = MN = A [\text{m/m}]$$

и

$$CB = xt [\text{m/m}],$$

где x искомый масштаб времен. Но, так как треугольники **ACO**

¹⁾ D есть точка пересечения пунктирной прямой с осью **OC** (на фигуре она пропущена по ошибке).

и OCB подобны, то

$$\frac{AC}{OC} = \frac{DC}{CB}$$

или

$$\frac{kc}{mV} = \frac{A}{xt}$$

С другой стороны из уравнения движения поезда

$$V = \zeta ct,$$

откуда

$$\frac{k}{m\zeta} = \frac{A}{x},$$

или

$$x = \frac{A\zeta m}{K} \dots \dots \dots 52$$

Например, если принять

$$m = 2$$

$$k = 10$$

$$\zeta = 120$$

$$A = 15,$$

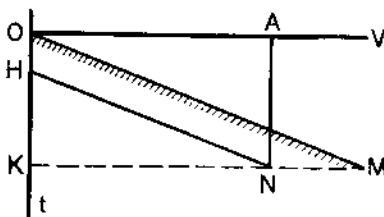
то

$$x = \frac{2400}{10} = 240$$

т. е. час будет выражаться 240 м/м, а минута 4 м/м.

Этот пример показывает также, какое удобство в смысле масштабов дает $\zeta = 120$. К сожалению, для товарных поездов, как мы видели, это равенство далеко не всегда применимо.

Переходя к масштабу второго интеграла, т. е. к масштабу пути y , обращаемся к фиг. 57, представляющей из себя часть фиг. 54 (см. стр. 125). На этой фигуре



Фиг. 57.

$$KM = ys \text{ [м/м]},$$

$$OA = KN = mV \text{ [м/м]},$$

$$AN = OK = xt \text{ [м/м]},$$

$$HK = B \text{ [м/м]},$$

где B произвольное число; но так как

$$\frac{HK}{OK} = \frac{KN}{KM},$$

то

$$\frac{B}{xt} = \frac{mV}{ys}$$

С другой стороны при постоянной скорости

$$s = Vt,$$

а потому

$$\frac{B}{x} = \frac{m}{y},$$

откуда на основании формулы 52

$$y = \frac{A \xi m^2}{B k} \dots \dots \dots 53$$

Так как A и B суть числа совершенно произвольные, то мы в праве сказать, что назначение их состоит в том, чтобы в целях наглядности или компактности наших построений исказить основные масштабы

$$x = \frac{\xi m}{k} \dots \dots \dots 52a$$

$$y = \frac{\xi m^2}{k}, \dots \dots \dots 53a$$

которые получаются при

$$A = B = 1.$$

Формулы 52a и 53a можно получить и непосредственно из соображений об измерениях тех именованных чисел, с которыми нам приходится иметь дело при тяговых расчетах. В самом деле любая ордината диаграммы

$$f - w = f(V),$$

имеющая длину

$$k(f - w) [m/m]$$

изображает собой некоторое ускорение

$$\xi(f - w) \left[\frac{km}{h^2} \right].$$

Иными словами для ускорений мы имеем масштаб

$$1 \left[\frac{km}{h^2} \right] = \frac{k}{\xi} [m/m]; \dots \dots \dots (*)$$

для скорости же мы задались

$$1 \left[\frac{km}{h} \right] = m; \dots \dots \dots (**)$$

откуда, деля (**) на (*), искомый масштаб времени

$$x = 1 \left[h \right] = \frac{\xi m}{k}; \quad 52a$$

точно также помножая (**) на 52a, находим

$$y = 1 \left[km \right] = \frac{\xi m^2}{k} 53a$$

§ 50. Способ Дубелира. Неудобство способа Дедуи состоит в том, что он дает кривую скорости в функции времени, между тем как профиль нам задается в функции пути. Поэтому, если мы хотели бы построить диаграмму скорости для целого перегона переменного профиля, то, пользуясь методом Дедуи, мы должны были бы для каждого элемента этого перегона не только строить

$$V = \varphi(t), \quad 5a$$

но и

$$s = \chi(t), \quad 6a$$

ибо иначе нельзя определить те t , которые соответствуют моменту вступления поезда на следующие элементы профиля. Между тем как, если бы мы умели строить

$$V = \psi(s), \quad 7a$$

такое построение вполне исчерпывало бы нашу задачу.

Это соображение и заставило Дубелира предложить свой способ графического построения кривой

$$V = \psi(s)^{1)} \quad 7a$$

В основу этого построения положен интеграл живых сил, который в применении к уравнению движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = \zeta(f - w)$$

имеет вид

$$\frac{V^2 - V_0^2}{2} = \zeta \int_0^s f ds - \zeta \int_0^s w ds.$$

Если же назвать

$$\frac{\zeta}{g} \int_0^s f ds = H_f$$

¹⁾ Дубелир. Исследование движения вагонов электрических железных дорог. Киев, 1908.

$$\frac{\xi}{g} \int_0^s w ds = H_w$$

и считать, что при $t = 0$ $V_0 = 0$, то формула (*) примет вид

$$\frac{V^2}{2g} = H_f - H_w, \quad 54$$

где все входящие величины имеют измерение длины. Если бы мы сумели построить оба H в функции от s , то на основании равенства (54) нахождение величины

$$h_w = \frac{V^2}{2g},$$

а по ней и

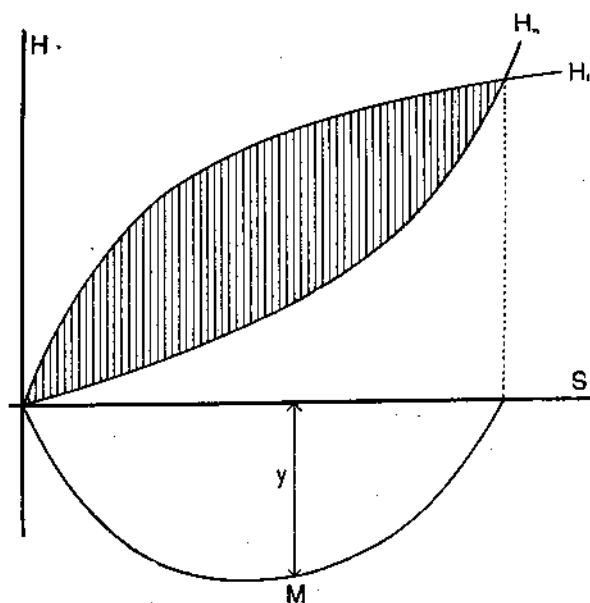
$$V = \sqrt{2gh_w} \quad 55$$

не представляло бы затруднений. Иными словами, имея оба H в функции s , легко построить и

$$V = \psi(s), \quad 7a$$

что собственно и составляет нашу задачу.

Нельзя не признать, что такое решение этой задачи несколько



Фиг. 58.

громоздко и искусственно, но к нему автор был привлечен дей-

ствительно изящной аналогией, даваемой уравнением (54). Представим себе, что мы построили оба H в функции от s , как показано на фиг. 58, и разницу их ординат, т. е. ординаты кривой

$$h_v = \frac{V^2}{2g} = \Phi(s),$$

отложим вниз от оси s . Представим дальше, что по этой кривой, расположенной в вертикальной плоскости, движется тяжелая материальная точка M , к которой никаких сил, кроме силы тяжести и реакции кривой, не приложено. Скорость этой точки в любой момент, как известно из механики, равна

$$v = \sqrt{2gy},$$

но так как

$$y = h_v = \frac{V^2}{2g},$$

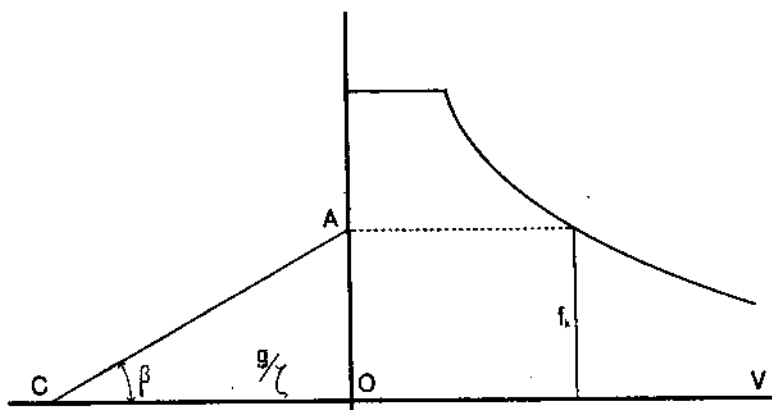
то, следовательно,

$$v = V.$$

Иными словами, скорость движения нашего поезда в любом месте пути равна скорости тяжелой точки, движущейся по кривой

$$h_v = \Phi(s).$$

Что же касается построения величин H_f и H_w , то оно осно-



Фиг. 59.

вано на том соображении, что угол, составляемый касательной к кривой

$$H_f = \frac{\xi}{a} \int_0^s f ds = \Phi_f(s)$$

с осью S ,

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{dH_f}{ds} = \operatorname{arctg} \frac{\xi}{g} f.$$

Поэтому, если мы влево от оси f диаграммы

$$f = \varphi(V)$$

отложим по оси V отрезок $OC = g/\xi$ (см. фиг. 59) то

$$\angle ACO = \operatorname{arctg} \frac{\xi f}{g} = \beta;$$

то же самое справедливо, очевидно, и по отношению кривой

$$H_w = \Phi_w(s),$$

пользуясь чем Дубелир и строит их.

§ 51. Способ Чечотта¹⁾. Цель, преследуемая этим методом, состоит тоже в получении зависимости

$$V = \psi(s),$$

но достигается она не графически, а совместным применением как графических, так и чисто аналитических приемов.

Именно диаграмму

$$f - w = f(\Gamma)$$

Чечотт заменяет ломаной линией, и в пределах каждого прямого звена ее строит

$$V = \psi(s),$$

вычисляя ее ординаты по формуле

$$s - s_0 = \frac{V - V_0}{b} + \frac{c}{b^2} \lg e \frac{b\Gamma + c}{b\Gamma_0 + c}, \quad \dots \dots \dots 56$$

получаемой из соединения формул 5л и 7л. Таким способом метод Чечотта по своему существу есть способ чисто аналитический и отличается от предложения Еракова и Петрова (стр. 114) только тем, что они применяли зависимость

$$\xi(f - w) = bV + c$$

¹⁾ Чечотт. Новый метод расчета времен перегонов. СПб. 1910. Значение этой книги отнюдь, однако, не исчерпывается методом автора; напротив, по богатству собранного в ней литературного материала и по глубине разбросанных в ней мыслей, она является весьма ценным пособием по всем отделам тяговых расчетов.

от $V = 0$ до $V = V_{\max}$, а Чечотт применяет ее в более тесных пределах.

Поэтому все те возражения, которые мы делали против аналитических приемов в смысле их громоздкости и возможности при них ошибок, казалось бы, применимы и к методу Чечотта. В действительности, однако, Чечотт обходит эти затруднения тем, что им составлены очень остроумные графические таблицы, дающие уже в готовом виде кривые

$$V = \psi(s, V_0)$$

для любых значений b и c . Графический же характер этих таблиц дает право и сам способ Чечотта назвать графо-аналитическим.

По идее к способу Чечотта очень близко подходит метод Штраля¹⁾, который заменяет диаграмму силы тяги (фиг. 3) двумя прямыми: одной в пределах ограничения по сцеплению, а другой — по котлу, и затем интегрирует уравнение движения поезда аналитически.

§ 52. Способ Фрея²⁾. Прием Фрея по существу отличается от приема Чечотта только тем, что в некоторых сравнительно тесных пределах он принимает вместо

$$\xi(f-w) = bV + c$$

еще более простую зависимость

$$\xi(f-w) = c;$$

иными словами, метод Фрея находится в таком же отношении к предложению Лакнера (стр. 115), как метод Чечотта к предложению Еракова и Петрова. Здесь необходимо отметить, что применение гипотезы

$$f-w=c$$

в достаточно тесных пределах не представляет из себя ничего непозволительного и что она же положена в основу метода Дедуи и, как мы увидим ниже, метода Липеца.

Интегрируя аналитически уравнение

$$\frac{dV}{dt} = c,$$

¹⁾ Glasers Annalen für Gewerbe und Bauwesen. 1913. II, стр. 89.

²⁾ The Engineer. 1913, I, стр. 462. Есть и отдельная брошюра: L. H. Fry. Lokomotive and Train Acceleration. 1913.

Фрей находит

$$t - t_0 = \frac{V - V_0}{c} \dots \dots \dots 57$$

и

$$s - s_0 = \frac{V^2 - V_0^2}{2c} \dots \dots \dots 58$$

Что же касается численных значений c для разных интервалов скоростей, то Фрей предлагает их вычислять из уравнения движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = \zeta (f - w_0 - i_k),$$

пользуясь данными о силе тяги паровоза и сопротивлении поезда. Иными словами, исходным пунктом метода Фрея, как и метода Дедуи, является диаграмма

$$\zeta (f - w) = f(V),$$

замененная рядом ступенек, в пределах которых

$$f(V) = \frac{dV}{dt} = c.$$

Только Дедуи (1898) интегрирование этого уравнения производит графически, а Фрей (1913) аналитически.

§ 53. Способ Липеца¹⁾. Построение Липеца так же, как и приемы Дубелира и Чечотта, имеют целью получить кривую

$$V = \psi(s),$$

но цель эта у Липеца достигается исключительно графическими приемами, притом гораздо проще, чем у них. Прием Липеца вытекает из того соображения, что касательная к кривой

$$V = \psi(s)$$

составляет с осью s угол

$$\delta = \arctg \frac{dV}{ds} = \arctg \frac{dV}{dt} \frac{1}{V}; \dots \dots \dots 59$$

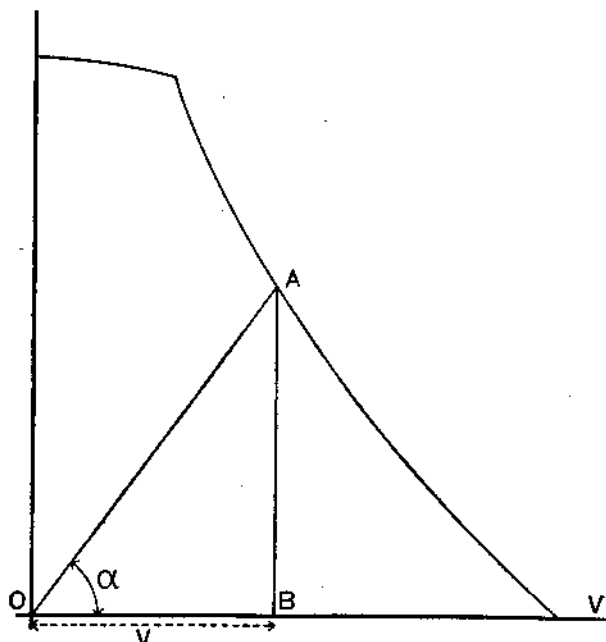
¹⁾ Самим Липецом способ этот описан впервые в Протоколах XXIX С. Съезда сл. тяги (1912), стр. 326, но еще раньше он был описан Чечоттом в „Железнодорожном Деле“ за 1911 г., стр. 134, и мной в Издании „Тяговых Расчетов“ (1912), стр. 62.

с другой стороны, если к любой точке диаграммы

$$f-w = \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt} = f(V)$$

(фиг. 60) провести луч из начала координат, то

$$\angle AOB = \operatorname{arctg} \frac{AB}{OB} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt} \frac{1}{V}.$$



Фиг. 60.

Если же масштабы $f-w$ и s в диаграмме

$$V = \psi(s)$$

относятся, как $\xi:1$, то

$$\angle AOB = \delta.$$

Иными словами, для любого масштаба кривой

$$f-w$$

можно подобрать такой вполне определенный масштаб для s , что

$$\angle AOB = \delta.$$

Исходя из этого соображения, делается очевидным, что если разбить диаграмму

$$f-w = f(V)$$

на ряд горизонтальных элементов, как это мы делали при способах Дедуи и Фрея, и провести прямая

1, 2, 3

(фиг. 61) перпендикулярные лучам

1', 2', 3'

соединяющим средину этих элементов с началом координат, то мы получим диаграмму

$$V = \psi(s).$$

Нельзя не признать, что способ Липца имеет все преимущества способа Дедуи; в тоже время свободен от его основного неудобства: получения скорости в функции времени, а не пути. По сравнению же со способами Дубелира, Чечотта и Фрея он несомненно проще.

В немецкой литературе Унрейном¹⁾ (Unrein) было предложено построение по идее совершенно тождественное с построением Липца.

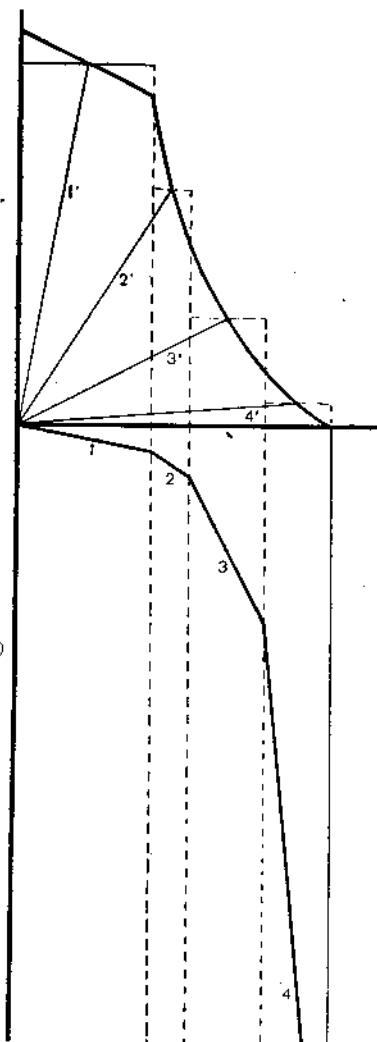
§ 54. Масштабы при способах Дубелира, Чечотта и Липца. Если масштабы диаграммы

$$f - w = f(V)$$

нам заданы, и если при построении кривой

$$V = \psi(s)$$

мы на ней хотим сохранить тот же масштаб скоростей, как на диаграмме $f - w$, то тем самым мы задаемся и определенным масштабом s ; масштаб этот определяется, очевидно, только масштабами V и



Фиг. 61.

¹⁾ Glasers Annalen, 1913. II., стр. 14.

$f-w$ и совершенно не зависит от того способа, которым получена диаграмма

$$V = \psi(s).$$

В самом деле, пусть масштаб $f-w$ равен $k \frac{m}{m}$ в $1 \frac{kg}{t}$, а масштаб скоростей $m \frac{m}{m}$ в $1 \frac{km}{h}$. Тогда отрезок **AB** равен

$$k(f-w) \left[\frac{m}{m} \right];$$

но с другой стороны, из уравнения

$$\frac{dV}{dt} = \zeta(f-w),$$

он изображает также

$$\zeta(f-w) \left[\frac{km}{h^2} \right].$$

Поэтому масштаб ускорений у нас таков, что

$$1 \left[\frac{km}{h^2} \right] = \frac{\zeta}{k} \left[\frac{m}{m} \right] \dots (*)$$

Вместе с тем по заданию

$$1 \left[\frac{km}{h} \right] = m \left[\frac{m}{m} \right], \dots (**)$$

откуда, возвышая (**) в квадрат и деля на (*)

$$y = 1 \left[km \right] = \frac{\zeta m^2}{k}, \dots \dots \dots 53a$$

как это мы уже имели раньше. Иными словами, при способах Дубелира, Чечотта, Липца и других, дающих

$$V = \psi(s),$$

масштаб пути

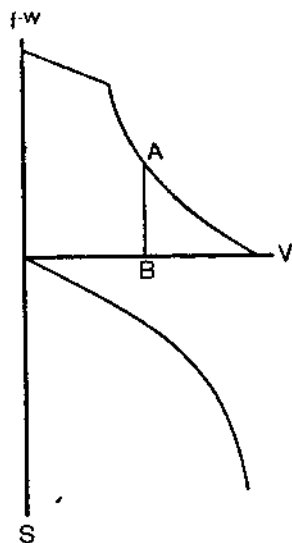
$$y = \frac{\zeta m^2}{k} \dots \dots \dots 53a$$

Если, например,

$$m = 2$$

$$k = 10,$$

$$\zeta = 120,$$



Фиг. 62.

то

$$y = \frac{120 \cdot 4}{10} = 48,$$

т. е. 48 м/м составят 1 километр.

Можно, конечно, задаться и обратно масштабами для V и s и искать масштаб, в котором должны быть отложены $f - w$. Пусть, например, мы хотим иметь 1 версту равной 100 м/м, т. е.

$$y = \frac{15}{16} \cdot 100 = 93,7$$

и

$$m = 2;$$

тогда при $\xi = 120$

$$k = \frac{\xi m^2}{y} = \frac{120 \cdot 4}{93,7} = 5,11.$$

В заключение еще раз отметим, что формула 53а верна только при сохранении на диаграммах

$$f - w = f(V)$$

и

$$V = \psi(s)$$

одного масштаба скоростей.

§ 55. Второй интеграл при способах Дубелира, Чечотта и Липеца. Очевидно, что приемы получения из кривой

$$V = \psi(s)$$

кривой

$$s = \chi(t)$$

совершенно не зависят от того, как была получена эта первая кривая. Поэтому любой из этих способов одинаково приложим как к кривым, полученным по способу Липеца, так и к кривым, полученным по способу Дубелира или Чечотта.

Способов получения второго интеграла из кривой

$$V = \psi(s)$$

предложено два: один Дубелиром¹⁾, другой Лебедевым²⁾.

Способ Дубелира состоит в том, что по кривой

$$V = \psi(s)$$

¹⁾ Дубелир. Исследование движения вагонов электрических ж. д. Киев. 1908, стр. 40.

²⁾ Журнал М. П. С. 1913, II кн., стр. 96.

он строит кривую

$$\frac{1}{V} = \psi(s),$$

площадь которой между двумя ординатами

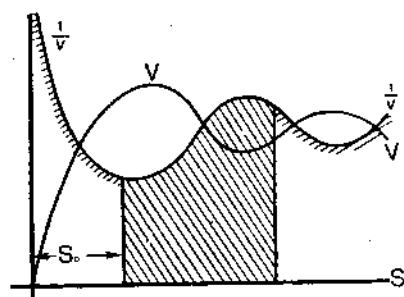
$$\int_{t_0}^t \frac{1}{V} ds = \int_{t_0}^t dt = t - t_0.$$

Благодаря этому равенству кривая

$$s = \zeta(t)$$

строится по кривой $1/V$ совершенно также как на стр. 127 мы ее строили по кривой

$$V = \varphi(t).$$



Фиг. 63:

Недостаток этого способа состоит в том, что в случаях когда $V = 0$, т. е. при остановках и троганье с места, кривая $1/V$ уходит в бесконечность и потому в определении ее площади легко сделать более или менее серьезную ошибку. Для устранения этого неудобства Лебедев и предложил свой способ. В основание его положен тот факт, что касательная к кривой

$$s = \zeta(t)$$

составляет с положительным направлением оси t угол

$$\vartheta = \arctg \frac{ds}{dt} = \arctg V.$$

С другой стороны, если кривую

$$V = \psi(s)$$

разбить на ряд интервалов и в пределах каждого из них считать V постоянной, а затем отложить отрезки $k\pi = 1/m$ [м/м] (фиг. 64), то углы k окажутся равными ϑ . Поэтому, проводя прямые 1, 2, 3... перпендикулярно лучам $k_1 m_1, k_2 m_2, k_3 m_3 \dots$ мы получим кривую

$$s = \zeta(t).$$

Что же касается способа Дубелира, то там для кривой

$$\frac{1}{V} = \Psi(s)$$

можно принимать произвольный масштаб.

На этом мы и закончим наши общие соображения об интегрировании уравнения движения поезда и перейдем к решению помощи его задач, выдвигаемых железнодорожной практикой.

ГЛАВА VI.

Тормазные задачи.

§ 56. Сущность тормазных задач. Работа тормазов характеризуется тремя величинами: 1) числом и силой их, т. е. величиной ϑ ; 2) начальной скоростью V_0 , при которой они были приведены в действие, и 3) тормазным путем s_k , который пройдет поезд под действием тормазов до остановки или до достижения некоторой заданной скорости V_k . Сообразно этому, задач на тормазы четыре:

- 1) по V_0 и ϑ найти s_k ,
- 2) по s_k и ϑ найти V_0 ,
- 3) по s_k и V_0 найти ϑ ,
- 4) по $V_k = \text{пост.}$ найти ϑ .

Решение последней задачи, т. е. нахождения тормазного условия, необходимого для поддержания равномерной скорости на крутых уклонах, было уже приведено на стр. 111. Это решение дается непосредственно уравнением

$$\frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt} = w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta = 0,$$

или графическим его изображением в виде диаграммы

$$w_0 + i_k = f(V).$$

В самом деле при $V_k = \text{пост.}$ w_0 и φ_k тоже являются величинами постоянными; поэтому искомое

$$\vartheta = \frac{i_k + w_0}{1000 \varphi_k} \dots \dots \dots 58$$

Остальные три задачи решаются помощью уравнения движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = \zeta f - \zeta (w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta),$$

причем обычно индикаторную силу тяги считают равной нулю. В самом деле, даже при экстренном торможении поезда из вагона, машинист, очевидно, немедленно закроет регулятор, как только заметит, что поезд тормазят. В этом случае уравнение движения поезда получает вид

$$-\frac{dV}{dt} = \sum_k w_k,$$

где

$$w_k = w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \text{ , } 59$$

И

$$w_0 = \frac{(w'_0 + w'_n)P + w'_0 Q}{P + Q}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 60$$

есть удельное сопротивление всего поезда на прямом и горизонтальном пути при закрытом регуляторе. К интегрированию этого уравнения одним из указанных в §§ 43–54 приемов и сводятся первые три тормазные задачи.

Что же касается их относительной важности, то на практике наиболее часто приходится иметь дело с второй задачей, т. е. с нахождением предельной скорости движения по тормазам, исходя из видимости сигналов

$$s'_k \equiv s_k \div t'_k V_0,$$

где t_k — то время, которое нужно затратить на приведение тормозов в действие.

§ 57. Аналитический способ. Для аналитического интегрирования уравнения

$$-\frac{dV}{dt} = \zeta (w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta) = \zeta w_k$$

прежде всего надо установить вид зависимости его правой части от скорости. Как мы видели на стр. 92, φ_k с достаточной точностью можно считать связанным с V линейной зависимостью

$$\varphi_k = 0,27 - 0,002 \text{ V};$$

виртуальный под'ем i_k есть величина постоянная; что же касается w_0 , то, как было указано на стр. 84, при закрытом регуля-

торе она выражается формулой вида

$$w_0 = E V^3 + A V^2 + B V + C.$$

Поэтому

$$\frac{dV}{dt} = a V^2 + b V + c + e V^3,$$

где

$$a = \zeta A$$

$$b = \zeta (A - 2 \vartheta)$$

$$c = \zeta (C + i_k + 270 \vartheta)$$

$$e = \zeta E.$$

Интегрирование такого уравнения вполне возможно, но в результате его получаются настолько сложные формулы, что практическое применение их почти невозможно. Правда, в виду относительной ничтожности члена с кубом скорости, коэффициент e можно считать равным нулю, однако и в этом случае формула для тормозного пути получается еще все-таки слишком сложной. В самом деле, на стр. 116, интегрируя уравнение

$$\frac{dV}{dt} = a V^2 + b V + c$$

для случая мнимых корней, мы нашли, что

$$s - s_0 = -\frac{b}{2a}(t - t_0) + \frac{1}{2a} \lg_e \frac{a V^2 + b V + c}{a V_0^2 + b V_0 + c} \quad 7к$$

и

$$t - t_0 = \frac{2}{m} \left[\operatorname{arctg} \frac{2 a V + b}{m} - \operatorname{arctg} \frac{2 a V_0 + b}{m} \right] \quad 5м$$

поэтому для уравнения

$$\frac{dV}{dt} = -(a V^2 + b V + c),$$

при

$$s - s_0 = s_k$$

и

$$V = V_k,$$

$$s_k = \frac{1}{2a} \lg_e \frac{a V_0^2 + b V_0 + c}{a V_k^2 + b V_k + c} - \frac{b}{a} \frac{1}{m} \left[\operatorname{arctg} \frac{2 a V_k + b}{m} - \operatorname{arctg} \frac{2 a V_0 + b}{m} \right] \quad 61$$

Сложность этой формулы исключает возможность ее широкого применения, и потому вполне понятно стремление свести уравнение затормаживаемого поезда к виду

$$-\frac{dV}{dt} = bV + c,$$

т. е. считать

$$w_0 = BV + C. \quad (*)$$

что дает

$$s_k = \frac{V_0 - V_k}{b} - \frac{c}{b^2} \lg e \frac{bV_0 + c}{bV_k + c} \quad 62$$

Как мы видели на стр. 83, сопротивление товарных поездов с достаточной точностью укладывается в формулу (*), и потому к ним выражение 62 можно применять без всяких оговорок. Иное дело пассажирские поезда; их сопротивление имеет ясно выраженную параболическую форму, и при пользовании формулой (*) легко сделать ошибку в определении w_0 на $1-1\frac{1}{2}$ килограмма на тонну. Влияние этой ошибки на величину dV/dt будет тем больше, чем меньшее значение имеют прочие члены правой части выражения 59. В пассажирских поездах на тормазные оси передается не менее $\frac{2}{3}$ всего веса поезда, и наибольшие нажатия колодок в среднем равны 0,5 давления на ось. Поэтому для экстренного торможения

$$\vartheta \geq \frac{1}{3},$$

что при скорости 80 km/h дает наименьшее

$$1000 \varphi_k \vartheta = \frac{1000}{3} (0,27 - 0,16) = 37,$$

или

$$w_0 \cong 7.$$

Иными словами, даже при $i = -10$

$$w_k = w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta = 34,$$

и ошибка при определении w_0 в $1\frac{1}{2}$ килограмма изменяет замедление поезда на

$$100 \frac{1,5}{34} = 4,4\%.$$

При умеренном же торможении, т. е. при

$$\vartheta \cong \frac{1}{3} \vartheta_m \cong 0,1$$

эта ошибка возрастает до

$$4,4 \frac{10}{3} = 16,6\%$$

с чем далеко не всегда можно мириться.

Таким образом мы видим, что при расчетах тормазов товарных поездов и при экстренном тормажении пассажирских можно с достаточной точностью пользоваться формулой 62; при плавном же тормажении пассажирских поездов благоразумнее пользоваться формулой 61, несмотря на всю ее громоздкость.

Надо, впрочем, сказать, что при решении первой задачи, т. е. при определении тормазного пути s_k , на котором при заданном ϑ скорость упадет с V_0 до V_k , вид формулы для s_k сравнительно мало отражается на сложности вычислений. В самом деле, в этом случае под знаком lg_e и $arctg$ стоят постоянные, вычисление которых не представляет никаких затруднений.

Иное дело, когда приходится определять V_0 или ϑ , входящее в b и c , т. е. решать уравнения, в которых неизвестные входят под знаками lg_e и $arctg$. Единственным выходом из этого затруднения является применение способа последовательных попыток. Способ этот при определении ϑ или точнее числа тормазов в поезде облегчается тем, что в данном случае приходится задаваться только целыми значениями этого числа. При определении же предельной скорости по тормазам это облегчение неприменимо.

Чтобы лучше разъяснить сказанное, разберем несколько цифровых примеров, взятых прямо из жизни.

Пример 1. Определить, исходя из длины тормазного пути в 250 саж., предельную скорость товарного поезда весом 720 тонн на уклоне 8‰ при 5 тормазильщиках и паровозе 1—4—0 Ш, у которого тормазятся все движущие колеса.

Сцепной вес этого паровоза 64,3 тонны, полный 75, вес тендера 53,3, тара его 23,8 т; поэтому, задаваясь δ для

паровоза	0,5
тендера	0,9
вагонов	0,5,

и помня, что тара товарного вагона в среднем около 7 тонн, имеем

$$\Sigma X = 0,5 (5 \times 7 + 64,3) + 0,9 \times 23,8 \approx 71$$

$$\vartheta = \frac{71}{75 + 53 + 720} \approx 0,0725.$$

Сопротивление поезда вычисляем по формуле

$$w_0 = 1,5 + 0,05 V,$$

коэффициент трения по формуле Дуаена, что дает

$$1000 \varphi_k \vartheta = 72,5 (0,27 - 0,002 V),$$

откуда

$$w_k = w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta$$

при $i_k = -8$ равно

$$(1,5 - 8 + 19,6) - (0,145 - 0,05) V = 13,1 - 0,095 V.$$

По заданию тормазной путь

$$s_k = 250 [\text{саж.}] = 0,5 [\text{вер.}].$$

Желая и искомую скорость получить в верстах в час мы должны

$$\zeta \cong 120 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}^2} \right]$$

выразить тоже в русских мерах, а так как

$$1 \left[\text{km} \right] = \frac{15}{16} [\text{вер.}],$$

то в русских мерах

$$\zeta = \frac{15}{16} 120 = 112.$$

Таким образом наша задача сводится к интегрированию уравнения

$$\frac{dV}{dt} = bV + c,$$

где

$$b = -112 \times 0,095 = -10,6,$$

$$c = 112 \times 13,1 = 1467.$$

Интегрировать это уравнение приходится, исходя из условия $V_k = 0$, что дает

$$s_k = -\frac{V_0}{b} - \frac{c}{b^2} \lg_e \frac{bV_0 + c}{c},$$

или

$$V_0 = bs_k + \frac{c}{b} \lg_e \frac{bV_0 + c}{c}$$

или, наконец,

$$V_0 = bs_k + \frac{c}{bM} \lg_{10} \left(1 + \frac{b}{c} V_0 \right),$$

где

$$M = 0,43429^1)$$

есть модуль десятичных логарифмов. Иными словами, наше уравнение имеет вид

$$V_0 = A + B \lg_{10} (1 + c V_0),$$

где

$$A = bs_k = -10,6 \times 0,5 = -5,3,$$

$$B = \frac{c}{bM} = -\frac{1467}{0,4343 \times 10,5} = -317,$$

и

$$C = \frac{b}{c} = -\frac{10,6}{1467} = -0,0073.$$

Решение этого уравнения, как уже указывалось выше, возможно только методом последовательных приближений, т. е. нам приходится задаваться рядом значений V_0 и подставлять их в обе части нашего уравнения до тех пор, пока они не окажутся равны между собой. Метод этот по существу своему ничем не отличается от совместного решения двух уравнений

$$y = V_0 \quad \dots \quad (a)$$

и

$$y = A + B \lg_{10} (1 + c V_0) \quad \dots \quad (b)$$

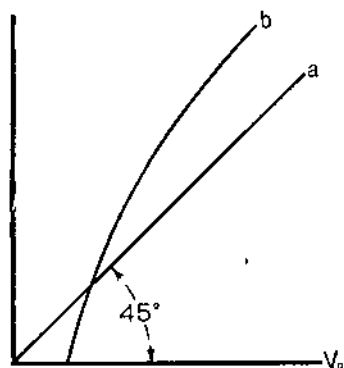
Решение же таких уравнений лучше всего производить графически, как показано на фиг. 65, строя их по точкам. Надо, однако, заметить, что строить кривую b от нуля до V так очень утомительно. Поэтому удобнее сперва выяснить, в каких приблизительно пределах V_0 лежит точка пересечения кривых a

и b и затем построить кривую b только в этих пределах. Иногда, впрочем, можно обойтись и без такого построения. Так, в нашем случае, задаваясь в виде первого приближения по указаниям практики $V_0 = 25$, мы получим для него, как показывает таблица

$$y_b = 22,23 < 25.$$

Задаемся далее $V_0 = 30$, для которой

$$y_b = 28,51 < 30,$$



Фиг. 65.

¹⁾ Логарифмическо-тригонометрическое руководство барона Вега. 74 изд. (1893), стр. 574.

и $V_0 = 35$, для которой уже

$$y_b = 35,05 > 35.$$

Таблица X.

V_0	25	30	35
$lg_{10} V_0$	1,39794	1,47712	1,54407
$lg_{10} C_g V_0$	1,25839	1,33757	1,40452
cV_0	0,18130	0,21755	0,25382
$1 - cV_0$	0,81870	0,78245	0,74618
$lg_{10} (1 - cV_0)$	1,91312	1,89345	1,87285
$-lg_{10} (1 - cV_0)$	0,08678	0,10655	0,12715
$lg [-lg_{10} (1 - cV_0)]$	2,93842	1,02756	1,10432
$lg [-B lg_{10} (1 - cV)]$	1,44019	1,52933	9,60609
$-V lg_{10} (1 - cV)$	27,55	33,83	40,37
y_b	22,23	28,51	35,05

Эти цифры дают нам право сказать, что искомая скорость лежит между 30 и 35 вер./час. и очень близко подходит к этой последней цифре; а так как в товарных поездах при отсутствии указателей скорости, ее можно регламентировать с точностью только до 5 верст в час, то на этом наш расчет можно и остановить, приняв

$$V_0 = 35 \text{ вер./час.}$$

Пример 2. Определить V_0 для того же паровоза и поезда, но при условии, что паровоз не тормозится.

В этом случае

$$\Sigma X = 0,5 \times 35 + 0,9 \times 23,8 = 38,9,$$

$$\vartheta = 0,04,$$

$$1000 \varphi_k \vartheta = 10,8 - 0,08 V,$$

$$w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta = 4,25 - 0,0296 V,$$

$$\zeta (w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta) = 476 - 3,35 V,$$

т. е.

$$b = 476$$

$$c = -3,35.$$

Решение этой задачи, также как и предыдущей, сводится к совместному решению уравнений

$$y = V_0 \quad (a)$$

$$y = A + B \lg_{10} (1 + c V_0), \quad (b)$$

где

$$A = bs_k = -1,6575,$$

$$B = \frac{c}{bM} = -330,6,$$

$$C = \frac{c}{b} = 0,007.$$

Задаваясь $V_0 = 20$, мы по формуле **b** получаем

$$y_b = 19,88 < 20,$$

задаваясь $V_0 = 25$ —

$$y_b = 25,83 > 25,$$

а задаваясь $V_0 = 21$ —

$$y_b = 21,04 > 21.$$

Поэтому можно считать

$$V_0 = 20,7,$$

но об'явить машинистам, конечно, надо

$$V_0 = 20.$$

Сопоставление результатов, получившихся при решении 1 и 2 примера, показывает нам, какое значение имеют тормазы на ведущих колесах, бездействующие на некоторых дорогах из-за экономии на колодках.

Пример 3. Скольким вагонным тормазам эквивалентны паровозные тормазы паровоза 1-4-0 III?

Решение этой задачи не требует интегрирования уравнения движения поезда. Оно дается непосредственным сравнением величины ΣX для паровоза и товарного вагона. У последнего

$$\Sigma X = 0,5 \times 7 = 3,5 [t],$$

у паровоза же III

$$\Sigma X = 0,5 \times 64,3 = 32,1$$

элементы 1, 2, 3 кривой

$$V = \varphi(t).$$

Очевидно, что при начальной скорости **OM**, **ON** дает время, через которое поезд остановится, а площадь **OMN** — тормазной путь. Для любой же начальной скорости V_0 , s_k равно заштрихованной площади. Поэтому для определения s_k по V_0 и обратно при заданном ϑ , нужно построить только одну диаграмму

$$V = \varphi(t),$$

и затем первая задача решается проведением прямых параллельных оси t и определением полученных таким образом площадей, а вторая подбором этих площадей.

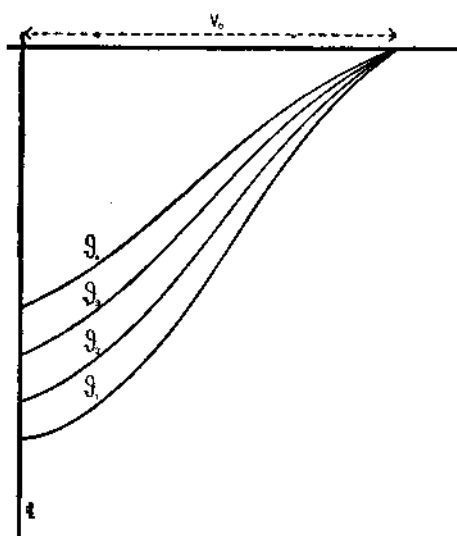
Само собой разумеется, что, если бы вместо

$$V = \varphi(t)$$

мы имели бы

$$V = \psi(s),$$

то ни с какими площадями нам не пришлось бы иметь дела. Вот почему для тормазных задач методы Чечотта, Дубелира и Липеца имеют перед методом Дедуи очевидное преимущество.



Фиг. 67.

Что же касается определения по заданным V_0 и s_k числа тормазных вагонов n , то для решения этой задачи приходится, задавшись рядом целых значений n , по ним подсчитать соответственные значения ϑ , и для каждого ϑ определить, как было указано выше значения s_k (фиг. 67). Очевидно, что то n будет искомым, которое дает s_k ближайшее большее к заданному.

Для лучшего уяснения сказанного применим способ Дедуи к решению тех же примеров, которые в предыдущем § мы решали аналитически, а также и еще к одному, взятому из пассажирской службы.

Пример 1. Принимая масштаб для

$$w_0 + i_k + 1000 \vartheta \varphi_k = w_k$$

$$k = 7,$$

а для скоростей

$$m = 2,$$

мы получаем диаграмму полного удельного сопротивления

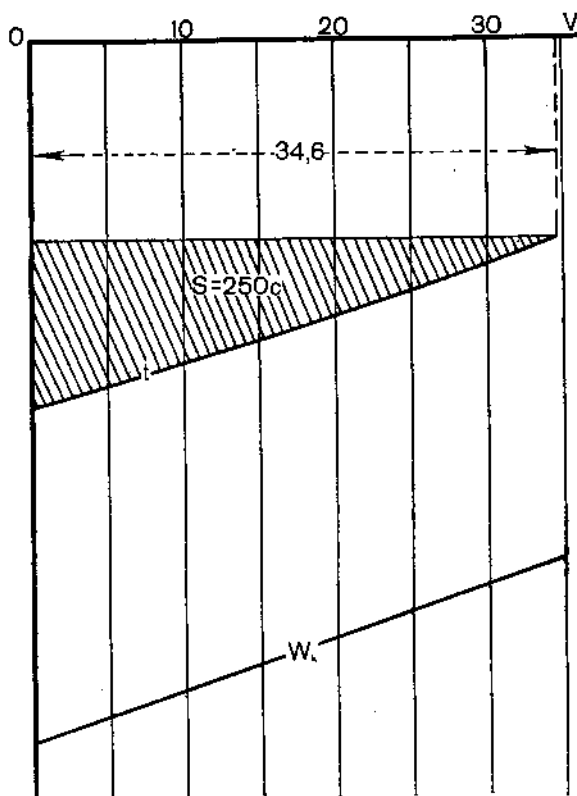
$$w_k = 13,1 - 0,095 V$$

на фиг. 68, в виде прямой — w_k . Принимая далее в способе Дедуи-Лебедева $A = 25$ м/м, получаем масштаб времени

$$x = \frac{25 \cdot 112}{7} = 800 \text{ [м/м]}$$

и пути (по площади)

$$y = mx = 1600 \text{ [м/м]}^2$$



Фиг. 68.

Поэтому, построив кривую t , как это было показано на фигуре 66, мы должны отсечь от нее площадь равную 1600 [м/м]^2 ,

что согласно фигуре 68, дает

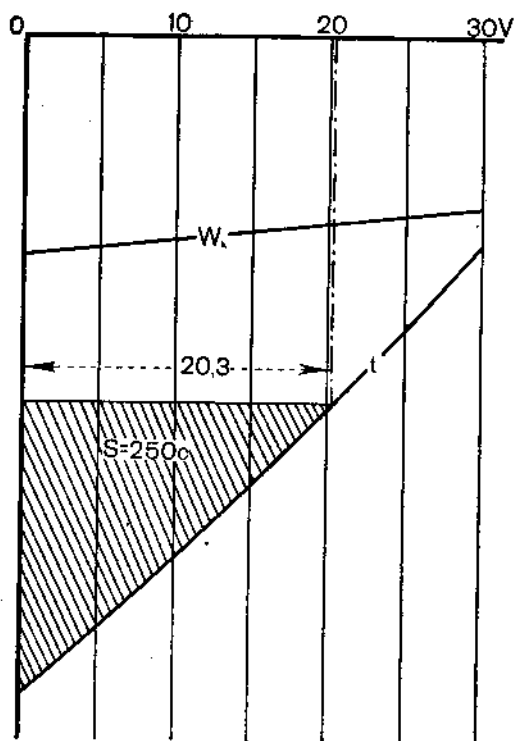
$$V_0 = 34,6.$$

При аналитическом же расчете мы имели $V_0 \approx 34,9$, т. е. на 1% больше. Сходимость эту для целей практики надлежит признать более чем достаточной.

Пример 2. Для этого случая

$$w_k = 4,25 - 0,0296 V;$$

поэтому в тех же масштабах прямая w_k , как показано на фиг. 69, будет лежать несколько выше, чем на фиг. 68. В итоге же после



Фиг. 69.

всех построений

$$V = 20,3;$$

в то время, как при аналитическом методе мы имели $V_0 = 20,7$. Сходимость тоже вполне удовлетворительная.

Пример 4.¹⁾ Требуется определить, на каком расстоянии и в какое время может быть остановлен на 6%₀₀ уклоне курьерский

¹⁾ Пример 3 не требует интегрирования — см. стр. 153.

поезд весом 300 тонн, идущий со скоростью 100 km/h при паровозе 2-3-0 К с трехосным тендером, если δ тах. во всех вагонах равно 0,5

Сцепной вес паровоза 47,4 [т]

Вес порожнего тендера 90,0 [т]

Вес паровоза с тендером 11,5 [т].

Поэтому при δ для паровоза 0,7 и тендера 0,9

$$\vartheta = \frac{47,4 \cdot 0,7 + 20,0 \cdot 0,9 + 300 \cdot 0,5}{300 + 115} = 0,485$$

Сопротивление паровоза при закрытом регуляторе берем по опытной формуле для паровоза К^у (см. стр. 84), сопротивление вагонов для безопасности по формуле Любимова-Дадаева, (стр. 75), а φ_k по формуле Дуаена (стр. 92).

Производя затем дальнейшие вычисления, как показано в таблице XI, и откладывая от оси V вниз вычисленные там значения

$$-\frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt} w_0 + i_k + 1000 \vartheta \varphi_k = w_k,$$

Таблица XI.

№	Скорость $V \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$	0	20	40	60	80	100
1	$P(w'_0 + w'_m)$	231	400	678	1140	1850	2890
2	Qw''_0	960	456	625	865	1175	1560
3	$(P + Q) 1000 \varphi_k \vartheta$	54377	46293	38220	30191	22135	14085
4	$\Sigma = (1) + (2) + (3)$	54935	47149	39523	32196	25160	18535
5	$(P + Q) i_k$	2493	2493	2493	2493	2493	2493
6	$\Sigma + (P + Q) i_k$	52442	44656	37030	29703	22667	16042
7	w_k	126,3	107,4	89,2	71,5	52,8	38,6

мы получим нашу основную кривую w_k , вычерченную на фиг. 70 в масштабах

$$k = 0,5 \text{ m/m}$$

$$m = 0,5 \text{ m/m}.$$

Задаваясь далее

$$A = 25 \text{ m/m},$$

т. е. масштабом времени

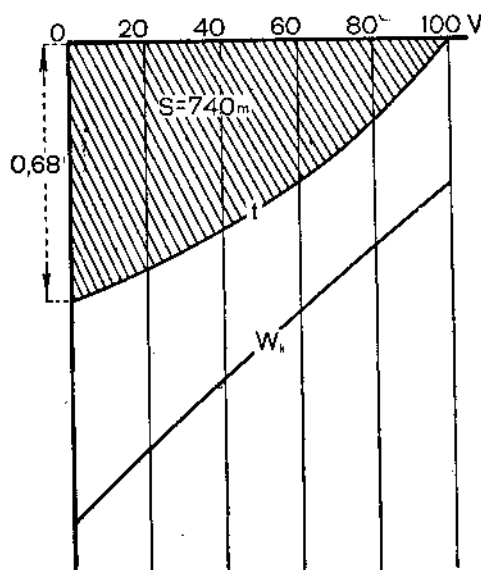
$$x = \frac{25 \cdot 120 \cdot 0,5}{0,5} = 300 \text{ m/m}$$

или 50 м/м минута, и пути

$$y = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ (м/м)}^2,$$

и производя построения, мы находим время торможения

$$t_k = 0,68'$$



Фиг. 70.

непосредственным измерением и

$$s_k = 704 \text{ м} \approx 420 \text{ саж.}$$

планиметрированием заштрихованной площади.

§ 59. Способ Липца. После всего сказанного на стр. 137–142 построение для случая

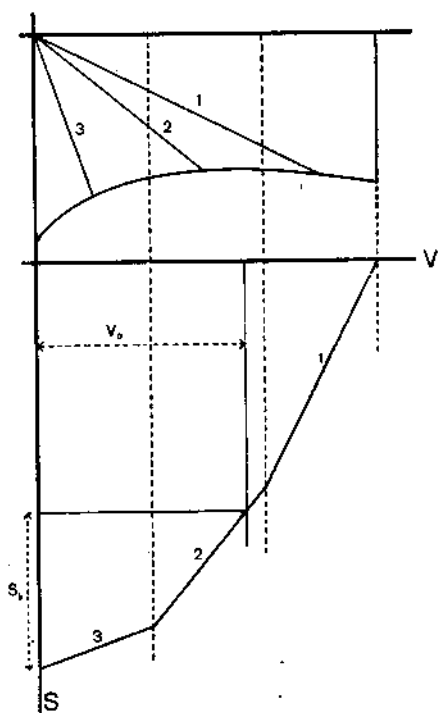
$$-\frac{dV}{dt} = \zeta (w_0 + i_k + 1000 \varphi_k \vartheta) = \zeta w_k$$

по способу Липца кривой

$$V = \psi(s)$$

как показано на фиг. 71 не встречает никаких затруднений. Нахождение же помощью этой кривой по заданной V_0 тормозного пути и обратно не требует ни добавочных построений, ни помощи планиметра. В этом громадное преимущество способа Липца, а также и Дубелира.

Что же касается определения по V_0 и s_k числа тормазов, то его,



Фиг. 71.

как и при способе Дедуи, можно производить только попытками.

В заключение применим способ Липца к примерам 1, 2 и 4

Пример 1. Задаемся масштабами

$$k = 7 \text{ м/м}$$

$$m = 2 \text{ м/м},$$

что дает

$$y = \frac{112 \cdot 4}{7} = 64 \text{ м/м}$$

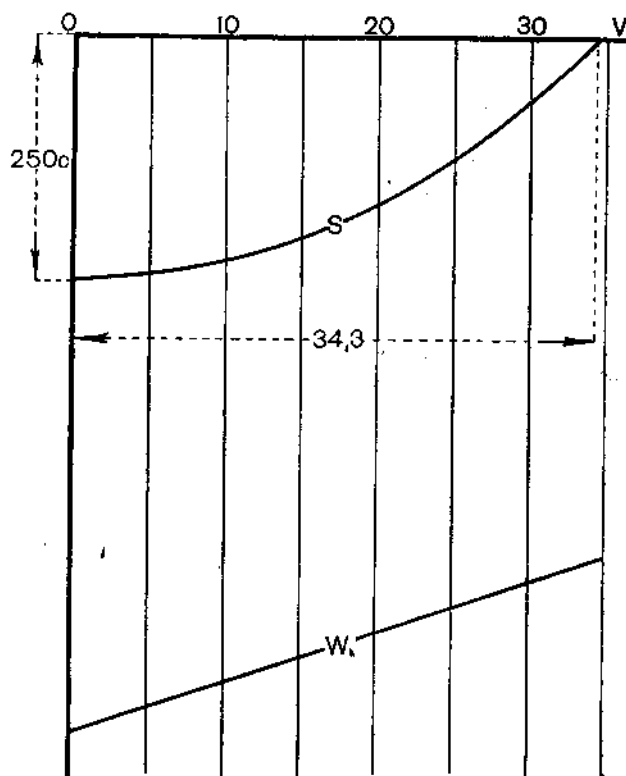
и строим, как было указано на стр. 156, диаграмму

$$w_k = w_0 + i_k + 1000 \vartheta \varphi_k = f(V).$$

Делим эту диаграмму вертикальными прямыми на ряд элементов; приводим к среднему значению w_k для каждого из этих элементов

лучи из начала и затем, восстанавливая к этим лучам перпендикуляры, получаем кривую

$$V = \psi(s),$$



Фиг. 72.

как это показано на фиг. 72. Из нее, задаваясь

$$s_k = 0,5 [\text{вер.}] = 250 [\text{саж.}],$$

мы находим непосредственно

$$V_0 = 34,3.$$

Пример 2. При тех же масштабах для 2-го примера (см. фиг. 73) мы находим

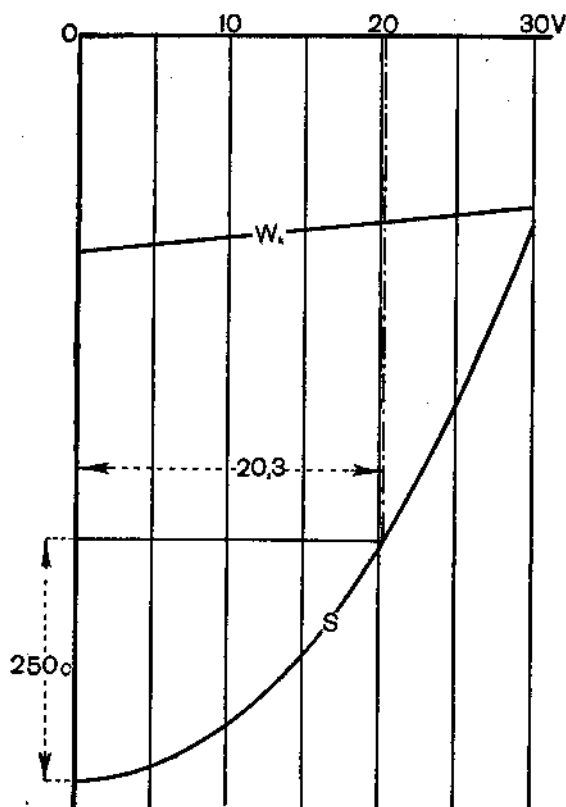
$$V_0 = 20,3.$$

Пример 4. Задаваясь масштабами

$$k = 0,5 \text{ м/м}$$

$$m = 0,5 \text{ м/м}$$

$$y = 120 \cdot 0,5 = 60 \text{ м/м},$$



Фиг. 73.

из фигуры 74 находим

$$s_k = 705 \text{ м} \approx 330 \text{ саж.}$$

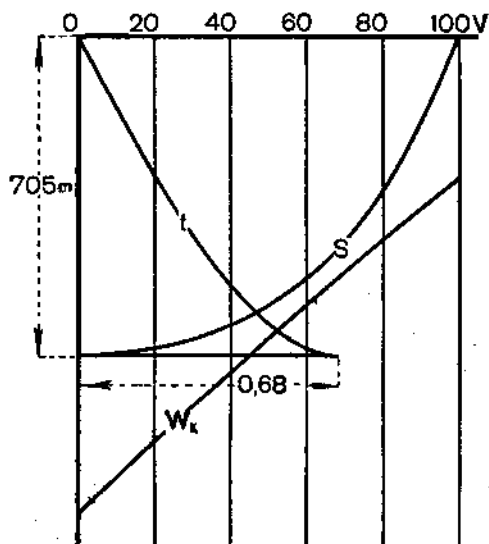
а строя кривую времени при $A = 25 \text{ м/м}$, т. е. в масштабе

$$x = 300,$$

находим и

$$t_k = 0,68',$$

как мы имели и при способе Дедуи.



Фиг. 74.

§ 60. Сравнение рассмотренных способов между собой.

Как уже не раз указывалось, аналитическое решение тормазных задач не требует никаких допущений, и потому в смысле точности все три рассмотренные способа можно считать одинаковыми. Именно, увеличивая число знаков при вычислениях и масштабы при построениях, мы можем достичь любой точности. Однако, как тоже было уже отмечено, особая точность при решении тормазных задач и не требуется, ибо регламентация V_0 производится обычно с точностью до 5 вер./час.

Что же касается простоты и наглядности, то здесь бесспорно преимущества на стороне графических приемов, ибо операции с Неперовыми логарифмами и методом последовательных приближений весьма утомительны, и вероятность ошибок при них довольно значительна.

Особенно же наглядным и удобным для тормазных задач является способ Липеца, связывающий как раз те две величины, зависимость между которыми и определяет существо тормазных расчетов, т. е. скорость и путь. Дело в том, что в подавляющем большинстве случаев время тормажения для целей практики безразлично и нам приходится или по V_0 определять s_k , или, обратно, по s_k V_0 . У Липеца зависимость между этими величинами получается одним построением, а у Дедуи двумя, или построением и планиметрированием.

ГЛАВА VII.

Расчеты времен хода поездов.

§ 61. Сущность задачи об определении времени хода. Исчисление времени хода поезда по перегону данного профиля по существу представляет из себя наиболее общую задачу механики поезда. Так как в большинстве случаев профиль от станции до станции имеет несколько переломов, то задача эта сводится к интегрированию уравнения движения поезда в пределах участков постоянного профиля и в суммировании затем полученных для каждого из таких участков времен хода. Как это ясно из формул 5—7 (стр. 16—17, 111, 116—118), и фигуры 42 (стр. 110), время следования поезда по такому элементарному участку есть функция не только его длины, но и начальной скорости; поэтому при расчетах времен хода по перегонам необходимо не только определять для каждого участка постоянного профиля время, но и ту скорость которая будет иметь место в конце его. Иными словами по самому существу вопроса, одного второго интеграла уравнения движения поезда для нас недостаточно и помимо его мы должны пользоваться обязательно хотя бы одним из первых интегралов. Это уже предопределяет преимущество способа Липеца, дающего

$$V = \psi(s),$$

перед способом Дедуи, дающего

$$V = \varphi(t),$$

ибо точки перелома профиля нам задаются в функции пути, а не времени.

С другой стороны время следования поезда по участку постоянного профиля находится в тесной зависимости от тех значений силы тяги, которые мы будем на нем реализовывать. Поэтому при определении времен хода, независимо от того способа, которым мы будем интегрировать уравнение движения поезда, мы всегда сталкиваемся с вопросом о том, какими значениями силы тяги мы должны задаваться. В общем виде на этот вопрос ответ дан на стр. 47—48. Если мы не претендуем на особую точность, то расчет времен хода надежнее всего вести по z , т. е. по кривым.

$$F_k = \varphi_k(z, V).$$

С другой стороны надо помнить, что фактически равновесие между работой котла и машиной, положенное в основу такого расчета, наблюдается только в том случае, если по условию профиля и движения приходится все время ехать с паром. Если же благодаря частым остановкам или уклонам машинист имеет возможность „поправляться“, то между закрытиями регулятора он может беспрепятственно нарушать условие $U = zH$. Поэтому в подобных случаях, если мы хотим приблизиться к действительности, то расчет времен хода более разумнее вести по отсечкам, т. е. кривым

$$F' = \varphi(q, s, V),$$

лишь поверяя средние значения z между остановками, или строя кривую уровня воды в котле¹⁾.

§ 62. Аналитический способ. Из сказанного ясно, что аналитическое определение времени хода состоит в том, чтобы интегрировать уравнение движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = f(V)$$

последовательно на всех участках, где f — w сохраняет свою непрерывность. Пусть длина их будет

$$s_1, s_2, s_3 \dots$$

а вид функции f на каждом из них назовем

$$f_1, f_2, f_3 \dots$$

Далее скорость в начале первого элемента назовем V_0 , в конце первого V_1 , в конце второго V_2 и т. д.

¹⁾ Чечотт. Новый метод.... 1910, стр. 239.

Тогда интеграл 76 дает

$$\left. \begin{aligned} s_1 - s_0 &= \int_{v_0}^{v_1} \frac{V dV}{f_1(V)} \\ s_2 - s_1 &= \int_{v_1}^{v_2} \frac{V dV}{f_2(V)} \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 76$$

Пользуясь этими формулами мы определяем скорости $V_1, V_2, \dots$, а затем помощью интегралов 56

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_0 &= \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{f_1(V)} \\ t_2 - t_1 &= \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{f_2(V)} \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 56$$

времена $(t_1 - t_0), (t_2 - t_1), \dots$. Искомое же

$$t_n - t_0 = \sum_0^n (t_i - t_{i-1}) \dots \dots \dots$$

После сказанного делается понятным, почему на стр. 114 уравнения 5 и 7 были приведены к симметричному виду

$$t - t_0 = \frac{1}{m} \lg_e \frac{V+h}{V_0+h} - \frac{1}{m} \frac{V+k}{V_0+k} \dots \dots \dots 5д$$

$$s - s_0 = -\frac{h}{m} \lg_e \frac{V+h}{V_0+h} + \frac{k}{m} \frac{V+k}{V_0+k}, \dots \dots \dots 7д$$

где

$$m^2 = b^2 - 4ac$$

$$h = \frac{b+m}{2a}$$

$$k = \frac{b-m}{2a};$$

при совместном пользовании интегралами 5 и 7 такая однотипность их конструкции представляет большие удобства в смысле сбережения времени.

Не надо однако забывать, что аналитическое интегрирование уравнения

$$\frac{dV}{dt} = f(V)$$

при

$$F_i > 0$$

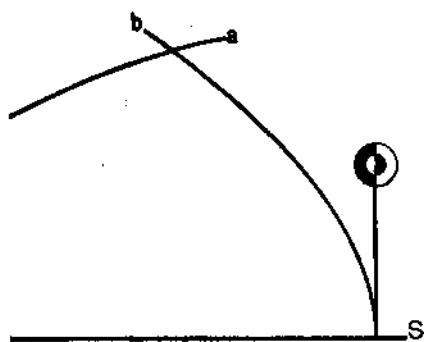
возможно только при некоторых допущениях о виде той зависимости, которая существует между силой тяги и скоростью. Именно для возможности интегрирования истинную кривую

$$F = \varphi(V)$$

приходится заменять параболой или прямой. Если такая замена совершается в сравнительно тесных пределах скорости, как это делает Чечотт (стр. 136) или по крайней мере в тех пределах, где F является определенной функцией от V , как это делает Штраль (стр. 136) и как это делаем мы при расчетах по отсечкам (стр. 115), то ошибка получается сравнительно небольшая. Если же одной параболой или прямой заменять и ту часть зависимости $f(V)$, которая обуславливается сцеплением, и ту, которая характеризует ограничение по котлу, как это предлагали Петров, Ераков, Романов и Стевар (стр. 111—112), то ожидать от аналитического интегрирования более или менее правдоподобных результатов едва ли возможно.

Между тем вычисления, которые приходится производить при нем, весьма утомительны. Не говоря уже о Неперовых логарифмах, с которыми необходимо иметь дело при применении формул 5д и 7д, при каждой остановке, при каждом ограничении скорости приходится сталкиваться с необходимостью

решать совместно весьма неудобные для этой цели уравнения. В самом деле для определения той точки пути, в которой надо закрыть регулятор и ввести в действие тормоза для того, чтобы остановиться как раз у пассажирского здания или для того, чтобы в заданном месте иметь назначенную скорость, мы должны, как показано на фиг. 75, решать совместно два уравнения



Фиг. 75.

$$V = \varphi_a(s) \quad \dots \dots \dots a$$

и

$$V = \psi_b(s), \quad b$$

из которых первое относится к действию пара, а второе тормазов. В общем случае (при трехчлене скорости) первое уравнение имеет вид

$$s = -\frac{1}{m} \lg_e \frac{V+h}{V_0+h} - \frac{1}{m} \frac{V+k}{V_0+k},$$

а второе

$$s = +\frac{b}{ma} \left(\operatorname{arctg} -\frac{b}{m} - \operatorname{arctg} \frac{2a}{-m} \frac{V+b}{-m} \right) + \frac{1}{2a} \lg_e \frac{c}{aV^2 + bV + c},$$

что делает их совместное решение весьма затруднительным. Несколько проще обстоит дело, если для $f(V)$ пользоваться линейными формулами. В этом случае приходится решать совместно два уравнения вида

$$s = \frac{V-V_0}{b} + \frac{c}{b^2} \lg_e \frac{bV+c}{bV_0+c},$$

что впрочем тоже требует применение метода последовательных приближений.

Пример 5. Определить наименьшее время хода дачного поезда весом 425 тонн, составленного из восьмиколесных вагонов по перегону Поворово-Крюково Ник. ж. д., при обслуживании его паровозом 2-3-0 Ку типа Московско-Казанской ж. д.¹⁾ на нефти.

Как было указано на стр. 165, для дачного движения, характеризующегося частыми остановками, расчет времени хода правильнее вести по отсечкам, тем более, что даже незначительный выигрыш во времени, благодаря займам у котла, для пригородных поездов, где дорога каждая минута, как это и подчеркнуто в задании, является весьма ценным. Кроме того, для аналитического расчета применение кривых

$$F_k = \varphi(\rho, \varepsilon, V),$$

а не

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

имеет то преимущество, что для них, как это было указано

¹⁾ Некомпаунд с высокоперегретым паром. Диаметр цилиндров $d = 575 \text{ мм}$; ход поршня $l = 650 \text{ мм}$; диаметр движущих колес $D = 1900 \text{ мм}$; давление в котле 13 кг/см^2 ; испаряющая поверхность нагрева $180,8 \text{ м}^2$; полная $228,2 \text{ м}^2$; площадь решетки $G = 3,18 \text{ м}^2$.

на стр. 115, всегда можно подобрать уравнения первого или второго порядка, очень близко подходящие к данным опыта, в то время, как замена кривой

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

параболой, как было указано на стр. 113, нередко может дать значительную ошибку.

Но теперь возникает вопрос, какими же комбинациями ϱ и ε надо задаваться в нашем частном случае. Прежде всего надо отметить, что при дачном движении на время хода весьма сильно отражается быстрота разгона. Поэтому, желая получить наименьшее время хода, мы при расчете должны задаваться наибольшей возможной комбинацией ϱ и ε . При опытах с паровозами серии K^y выяснилось, что такой комбинацией является 1—0,4, т. е. открытие регулятора во всю и наполнение в 40%. При больших отсечках на малых скоростях паровоз сильно баксует, а на больших теряет перегрев, вследствие „захлебывания“ перегревателя. Останавливаясь для разгона на этой комбинации, мы должны еще решить, до какой скорости ею можно пользоваться. При опытах выяснилось, что при нефтяном отоплении и тех размерах конуса и форсунки, которые предвидены утвержденными чертежами этого паровоза, снимать с 1 м² поверхности нагрева пара больше чем 47 kg. в час представляется уже затруднительным. Соответственная кривая

$$F_k = \varphi_k(z, V),$$

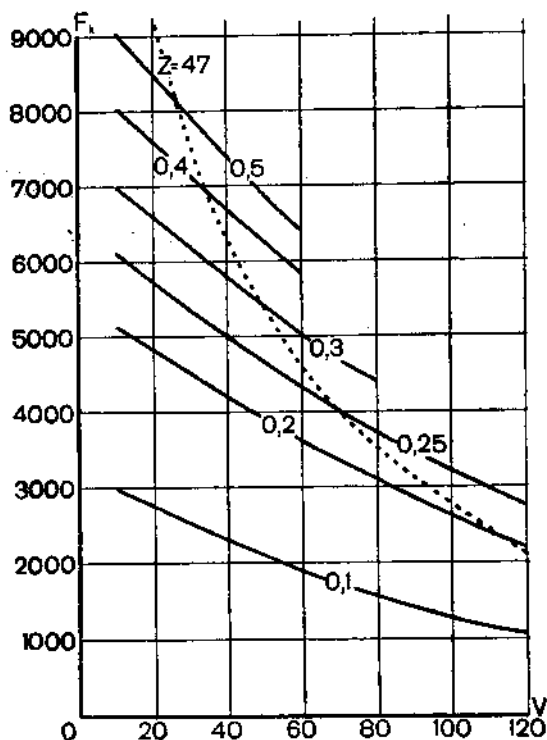
нанесена пунктиром на фиг. 76, где сплошные кривые представляют из себя зависимости

$$F_k = (\varrho, \varepsilon, V),$$

полученные для рассматриваемого паровоза при $\varrho = 1$ опытным путем. Из этой фигуры мы видим, что при максимальной форсировке котла он может обрабатывать комбинацию 1—0,4 только до $V = 33$ km/h. Допуская же в период разгона некоторое понижение уровня воды в котле, можно ехать на 1—0,4 и до $V = 50$, как это мы и примем для расчета.

Несколько сложнее представляется вопрос о том, какими комбинациями следует задаваться для дальнейшего движения нашего поезда по расчетному перегону. С экономической точки зрения, конечно, желательно держаться абсолютно наивыгоднейшей комбинации (см. стр. 44), а с точки зрения удобства пассажиров и нашего задания таких, которые дадут наименьшее

время. В данном случае, однако, между этими двумя требованиями нет особенных противоречий, ибо согласно опытам абсолютно наивыгоднейшей комбинацией для данного паровоза является $1 - 0,25$, для которой кривая F_k пересекает (фиг. 76) кривую



Фиг. 76. $Ky \cdot \rho = 1$.

$z = 47$ при $V = 70$ km/h. Поэтому переходя при $V = 50$ с $1 - 0,4$ сразу на $1 - 0,25$, и поддерживая $z = 47$ мы будем до $V = 70$ пополнять запас тепла в котле; когда же скорость превысит 70 km/h, то машина опять начнет занимать тепло у котла. А так как дачные поезда Ник. ж. д., благодаря частым остановкам, очень редко разгоняются свыше чем до 90 km/h, то можно с уверенностью сказать, что при таком способе езды воды в стекле должно хватить.

Следующий вопрос, который нам надо решить, это, где нам надо закрыть регулятор и начать тормажение. Последнее, как было указано, решается расчетом; что же касается времени закрытия регулятора, то повседневная практика показывает, что в виду расположения ст. Крюково на кривой и плохой видимости

входного семафора со стороны Петрограда благоразумнее закрываться не позже начала 571 версты.

Таким образом решив вести наш расчет по отсечкам, мы задаемся следующей программой управления паровоза: от Поворова и до достижения скорости 50 km/h 1—0,4, далее до начала 571 версты 1—0,25, и затем по инерции до той точки пути, где надо начать тормажение.

Что же касается сопротивления, то для сопротивления паровоза K^y , как повозки, воспользуемся формулой

$$w'_0 = 1 + 0,03 V + 0,0004 V^2,$$

выведенной из опытов над этим паровозом (см. фиг. 30 на стр. 82), для сопротивления вагонов формулой Лебедева

$$w''_0 = 1,5 + 0,5 V \frac{V + 10}{1000}$$

(см. стр. 76), а для полного сопротивления паровоза при закрытом регуляторе формулой

$$w'_0 + w'_m = 2 + 0,06 V + 0,0004 V^2 + 0,000013 V^3,$$

полученной из специальных опытов с этим типом паровоза (см. стр. 84). Наконец для плавного тормажения примем, как было указано на стр. 100,

$$\vartheta = 0,1.$$

При этих формулах и при кривых F_k , приведенных на фиг. 76, разность

$$f_k - w_0 = \frac{F_k - Pw'_0 - Qw''_0}{P + Q}$$

для площадки при комбинациях 1—0,4 и 1—0,25 выражается сплошными кривыми фиг. 77. Из нее видно, что, не рискуя сделать заметную ошибку, можно для 1—0,4 при скоростях меньших 50 km/h заменить истинную кривую $f_k - w_0$ прямой

$$f_k - w_0 = 14,5 - 0,12 V,$$

нанесенной на эту фигуру пунктиром. Равным образом для 1—0,25 при скоростях больших 50 km/h сплошную кривую можно заменить пунктирной прямой

$$f_k - w_0 = 12 - 0,13 V.$$

Таким образом при езде с паром в нашем случае уравнение дви-

жения поезда может быть представлено под видом

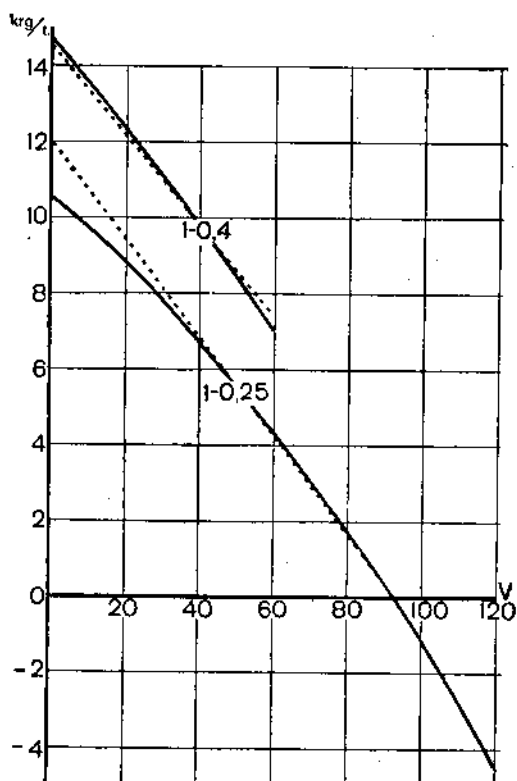
$$\frac{dV}{dt} = \zeta (f_k - w_0 - i_k) = \zeta (a - bV),$$

что дает интегралы

$$t - t_0 = -\frac{1}{\zeta b} \lg e \frac{a - bV}{a - bV_0} \quad 5л$$

и

$$s - s_0 = -\frac{a}{\zeta b^2} \lg e \frac{a - bV}{a - bV_0} - \frac{1}{\zeta b} (V - V_0), \quad 7л$$



Фиг. 77. Ку. $\Omega = 425$.

где a зависит от профиля и от комбинации, а b только от этой последней.

Приступая на основании этих формул к исчислению времени хода данного поезда на перегоне Поворово-Крюково, прежде всего обратимся к его профилю, представленному на фиг. 78.

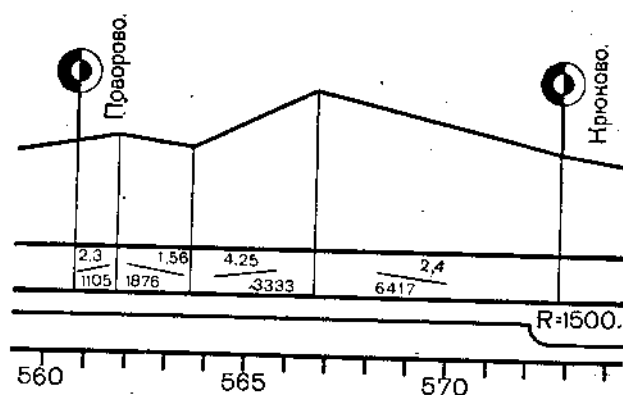
Профиль этот состоит из 4 элементов, причем для первого из них

$$i_k = 2,3$$

$$s - s_0 = 1,105 \text{ [km]}$$

$$V_0 = 0$$

$$t_0 = 0,$$



Фиг. 78.

что при $\varrho = 1$ и $\varepsilon = 0,4$, т. е. при $V < 50$ дает

$$a = 14,5 - 2,3 = 12,2$$

$$b = 0,12,$$

или принимая $\zeta \approx 120$

$$t = -\frac{1}{120 \cdot 0,12} \lg_e \frac{12,2 - 0,12 V}{12,2} = 0,06944 \lg_e (1 - 0,00984 V) \quad 5_1$$

и

$$s - s_0 = -\frac{12,2 \cdot 0,06944}{0,12} \lg_e (1 - 0,00984 V) - 0,06944 V =$$

$$= -7,0602 \lg_e (1 - 0,00984 V) - 0,06944 V. \quad 7_1$$

Раньше чем помощью формулы 5_1 определить время хода по первому элементу мы должны определить по формуле 7_1 , при $s - s_0 = 1,105$, скорость в конце его; при этом, если она окажется больше 50, по формуле же 7_1 надо найти такое s для которого $V = 50$. Формулы 5_1 и 7_1 можно применять только до этого s ; на остальной же части первого элемента мы должны в этом случае взять a и b соответствующие комбинации $1 - 0,25$.

Решить уравнение 7_1 сразу относительно V нельзя и потому приходится прибегнуть к способу последовательных приближений, для чего его удобнее представить под видом

$$V = -101,670 \lg_e(1 - 0,00984 V) - 15,91,$$

или для возможности пользования десятичными логарифмами под видом

$$V = -234,10 \lg_{10}(1 - 0,00984 V) - 15,91,$$

как это получается из предыдущего на основании зависимости

$$\lg_e x = 2,30258 \lg_{10} x.$$

Для первого приближения берем, как показано в таблице XII, $V = 50$ и получаем

Таблица XII.

Приближения	1-ое	2-ое	3-ье
V	50	45	47
$0,00984 V$	0,4918	0,4426	0,4623
$1 - 0,00984 V = k$	0,5082	0,5574	0,5377
$k_{10} k$	-0,29397	-0,25385	-0,26945
$-234,10 k$	68,8	59,4	63,1
$V = -234,1 k - 15,9$	52,9	43,5	47,2

$$V = 52,9 > 50;$$

во второй раз задаемся $V = 45$ и получаем

$$V = 43,5 < 45,$$

в третий задаемся $V = 47$ и получаем

$$V = 47,2 > 47;$$

однако, эта последняя разница настолько незначительна, что четвертого приближения можно и не делать, а принять сразу в конце первого элемента

$$V_1 = 46,9.$$

Таким образом мы видим, что он весь приходится при $\varrho = 1$ и $\varepsilon = 0,4$ и потому для него можно сразу определить время по

формуле 5₁ которая получает вид

$$t_1 = -0,06944 \lg_e (1 - 0,00984 \cdot 46,9),$$

или

$$t_1 = -0,1599 \lg_{10} 0,5377 = 0,0431 [\text{h}].$$

Переходим тепер ко второму элементу профиля; для него

$$i_k = -1,56$$

$$s - s_0 = 1,876$$

$$V_0 = V_1 = 46,9$$

$$t_0 = t_1$$

и для комбинации 1-0,4

$$a = 14,5 + 1,56 = 16,06$$

$$b = 0,12.$$

На этой комбинации мы условились ехать до $V = 50$; поэтому длина той части второго элемента, на которой будет сохраняться эта комбинация, согласно формулы 7₂, равна

$$s'_2 - s_1 = - \frac{16,06 \cdot 2,30958}{0,0144 \cdot 120} \lg_{10} \frac{16,06 - 0,12 \cdot 50}{16,06 - 0,12 \cdot 46,9} - \\ - \frac{1}{120 \cdot 0,12} (50 - 46,9) = 0,118 [\text{km}]$$

Соответственное же время

$$t'_2 - t_1 = -0,1599 \lg_{10} 0,96545 = 0,0024 [\text{h}].$$

По достижении скорости $V = 50$ мы условились ехать на 1-0,25, что для $i_k = -1,56$ дает

$$a = 12 + 1,56 = 13,56,$$

$$b = 0,13.$$

Поэтому для определения скорости V_2 в конце второго элемента профиля мы имеем формулу 7₁ под видом

$$1,756 = - \frac{13,56 \cdot 2,30258}{0,13 \cdot 0,13 \cdot 120} \lg_{10} \frac{13,56 - 0,13 V_2}{13,56 - 0,13 \cdot 50} - \frac{1}{0,13 \cdot 120} (V_2 - 50),$$

или после преобразований под видом

$$V_2 = 22,604 - 240,177 \lg_{10} \frac{13,56 - 0,13 V_1}{7,06} \quad \dots \quad 7_2$$

Решая это уравнение методом последовательных приближений, как показано в таблице XIII, находим

$$V_2 = 69,7,$$

Таблица XIII.

Приближения	1-ое	2-ое	3-ье	4-ое
V	70	72	68	69,7
$m = \frac{13,56 - 0,13 V}{7,06}$	0,63178	0,5949	0,66856	0,63739
$lg_{10} m$	-0,18983	-0,22556	-0,17486	-0,19629
$240,177 lg_{10} m$	-47,9	-54,2	-42,0	-47,1
$V = 22,6 - 240,177 lg_{10} m$	70,5	76,8	64,6	69,7

откуда по формуле 5₂

$$t_2 - t'_2 = - \frac{2,30958}{0,13 \cdot 120} lg_{10} \frac{13,56 - 0,13 \cdot 69 \cdot 7}{13,56 - 0,13 \cdot 50} = 0,0280 \text{ [h]}.$$

Для третьего элемента профиля

$$i_k = +4,25$$

$$s_3 - s_2 = 3,333$$

$$V_0 = V_2 = 69,7,$$

что при комбинации 1-0,25 дает

$$a = 12 - 4,25 = 7,75,$$

$$b = 0,13.$$

Скорость в конце этого элемента V_3 находится из уравнения 7_л, принимающего для него вид

$$3,333 = - \frac{7,75 \cdot 2,30258}{0,13 \cdot 0,13 \cdot 120} lg_{10} \frac{7,75 - 0,13 V_3}{7,75 - 0,13 \cdot 69,7} -$$

$$- \frac{1}{120 \cdot 0,13} (V_3 - 69,7),$$

или

$$V_3 = -137 \cdot 269 lg_{10} \frac{7,75 - 0,13 V}{-1,35} + 18 \quad . \quad . \quad . \quad 7_3$$

который указывает, что скорость на этом элементе будет падать. Задавая рядом V_3 , как указано в таблице XIV, находим

Таблица XIV.

Приближения	1-ое	2-ое	3-ье	4-ое
V	65	63	64	64,4
$m = \frac{7,75 - 0,13 V}{-1,35}$	0,58846	0,32593	0,42963	0,46074
$lg_{10} m$	-0,26884	-0,48688	-0,36689	-0,33654
$-137,269 lg_{10} m$	46,9	66,8	50,4	46,2
$V = 18 - 137,269 lg_{10} m$	54,9	84,8	68,4	64,2

$$V_3 = 64,4,$$

откуда по формуле

$$t_3 - t_2 = - \frac{2,30258}{0,13 \cdot 120} lg_{10} \frac{7,75 - 64,4 \cdot 0,13}{-1,35} = 0,0510.$$

Четвертый элемент профиля, имеющий

$$i_k = -2,4$$

$$V_0 = V_8 = 64,$$

мы должны разбить на три части: на первой от начала уклона до начала 571 версты мы условились ехать на $1-0,25$, на второй от начала 571 версты до некоторого

$$s = s_4''$$

без пара, но и без тормазов, а на остальном пути до Крюкова на тормазгах. Для первой части

$$s'_4 - s_3 = 3,542$$

$$a = 12,0 + 2,4 = 14,4.$$

$$b = 0,13.$$

Поэтому скорость в конце ее

$$\begin{aligned} V'_4 &= - \frac{a}{b} lg_e \frac{a - b V'_4}{a - b V_8} - b \zeta (s'_4 - s_3) + V'_3 = \\ &= -255,055 lg_{10} \frac{14,4 - 0,13 V'_4}{6,041} = 12,0, \end{aligned}$$

или после ряда последовательных подстановок указанных в таблице XV,

Таблица XV.

Приближения	1-ое	2-ое	3-ье
V	90	85	87,2
$m = \frac{14,4 - 0,13}{6,041}$	0,44695	0,55454	0,50720
$l_{K_{10}} m$	-0,34975	-0,25607	-0,29482
$-255,055 l_{K_{10}} m$	88,2	65,4	75,196
$V = 255,055 l_{K_{10}} m + 12,0$. . .	100,2	77,4	87,2

$$V_1 = 87,2,$$

откуда

$$t_4 - t_3 = \frac{2,30258}{15,6} \lg_{10} \frac{14,4 - 0,13 \cdot 87,2}{14,4 - 0,13 \cdot 64} = 0,0435.$$

Переходя ко второй части 4-го элемента профиля, на протяжении которого поезд идет без пара и без тормазов, отметим, что ни скорости ни расстояния s'' в конце ее мы не знаем и должны их определить как было указано на стр. 167 путем совместного решения уравнений

$$V = \psi(s)$$

для второй и третьей части нашего элемента. Как показывает фиг. 79 (стр. 179) в пределах от $V = 100$ до $V = 70$

$$w_0 = \frac{(w'_0 + w'_m)P + w''_0}{P + Q}$$

для данного случая довольно близко подходит к пунктирной прямой

$$w_k = -5 + 0,155V,$$

откуда при $i_k = -2,4$

$$a = 7,4$$

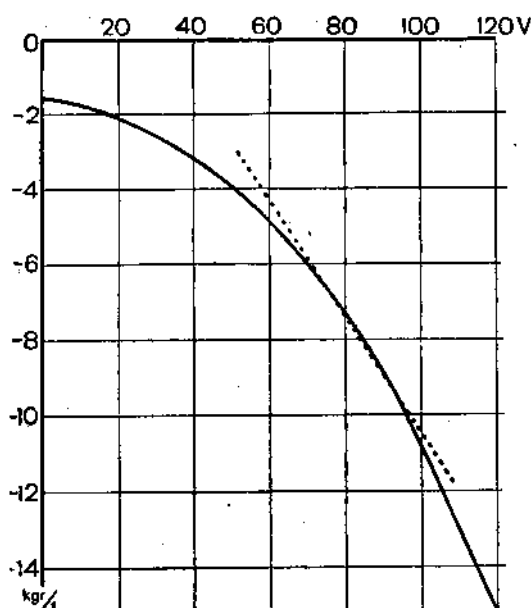
$$b = 0,155,$$

и следовательно уравнение

$$V = \psi(s)$$

для второй части 4-го участка имеет вид

$$s - s'_4 = -5,91 \lg_{10} \frac{7,4 - 0,155 V}{-6,116} - 0,0538 (V - 87,2).$$



Фиг. 79.

Для третьей же части, т. е. при действии тормазов, приведение w_k к линейной формуле от V как было указано на стр. 149 не может быть вообще говоря рекомендовано; однако, не желая иметь дело с arctg 'сами, и принимая во внимание, что при подходах к станциям характер тормажения настолько зависит от опытности, характера и привычек машиниста, что принятое нами $\vartheta = 0,1$ уже само по себе довольно произвольно, мы и для этого случая остановимся на двухчленной формуле, хотя нельзя не признать, что пунктирная прямая фигуры 80

$$w_k = -25,1 + 0,1 V$$

отличается очень резко от сплошной кривой, представляющей из себя результат подсчетов по формулам, приведенным на стр. 171.

Останавливаясь тем не менее на пунктирной прямой, мы имеем для последней части 4-го участка

$$a = -27,5$$

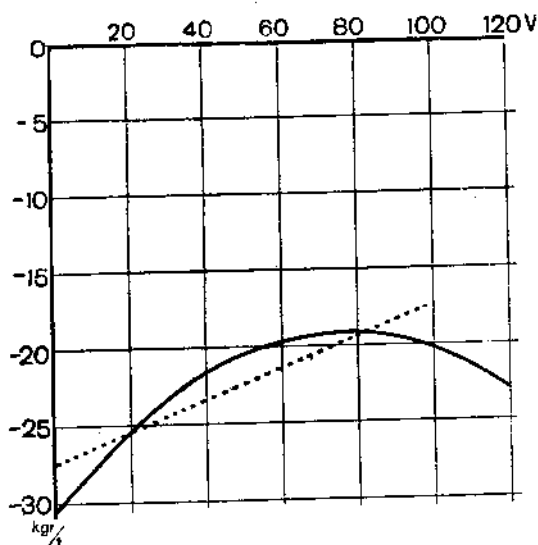
$$b = 0,1$$

$$V_0 = V'_4$$

$$V_k = 0,$$

откуда

$$s_4 - s_4'' = -0,0834 V_4'' - 52,7675 \lg_{10} \frac{27,5 - 0,1 V_4''}{27,5}.$$



Фиг. 80.

С другой стороны, для второй части

$$s_4'' - s_4' = -5,91 \lg_{10} \frac{7,4 - 0,155 V_4''}{-6,116} - 0,0538 (V_4'' - 87,2)$$

и, кроме того, согласно профиля

$$s_4 - s_4'' + s_4'' - s_4' = s_4 - s_4' = 2,875.$$

Поэтому для определения V_4'' мы имеем уравнение

$$\begin{aligned} 2,875 = & -5,91 \lg_{10} \frac{4,7 - 0,155 V_4''}{-6,116} - \\ & - 52,77 \lg_{10} \frac{27,5 - 0,1 V_4''}{27,5} - 0,01372 V_4'' + 4,6881. \end{aligned}$$

Это уравнение можно представить под видом

$$\begin{aligned} V_4'' = & -43,087 \lg_{10} \frac{7,4 - 0,155 V_4''}{-6,116} - 384,670 \lg_{10} \frac{27,5 - 0,1 V_4''}{27,5} + \\ & + 13,218. \end{aligned}$$

Решая его помощью последовательных приближений, как показано

в таблице XVI находим

$$V_4'' = 73,2.$$

Таблица XVI.

Приближения	1-ое	2-ое	3-ье	4-ое
V	80	70	75	73,2
$m = \lg \frac{7,4 - 0,155 V_4''}{-6,116}$.	0,81753	0,56409	0,69081	0,64193
$\lg m$	-0,08740	-0,24865	-0,16064	-0,19251
$-43,087 \lg m = p$. . .	3,766	10,714	6,921	8,295
$n = \lg \frac{27,5 - 0,1 V_4''}{27,5}$.	0,70909	0,74545	0,72727	0,73382
$\lg n$	-0,14934	-0,12768	-0,13831	-0,13441
$-384,670 \lg n = q$. . .	57,444	49,076	53,203	51,703
$p + q + 13,218$	74,429	73,006	73,342	73,226

Итак, торможение надо начинать при скорости, равной 73,2 [km/h]. Время от момента закрытия регулятора до достижения этой скорости

$$t_4'' - t_4 = - \frac{2,30258}{0,155 \cdot 120} \lg_{10} \frac{7,4 - 0,155 \cdot 73,2}{7,4 - 0,155 \cdot 872} = 0,0238.$$

Время же от начала торможения до остановки

$$t_4'' - t_4' = - \frac{2,30258}{b\xi} \lg_{10} \frac{bV_4'' - a}{-a} = - \frac{2,30258}{12} \lg_{10} 0,7342 = 0,0257.$$

Таким образом мы имеем

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,0431 \\ t_2' - t_1 &= 0,0024 \\ t_2 - t_2' &= 0,0280 \\ t_3 - t_2 &= 0,0510 \\ t_4' - t_3 &= 0,0435 \\ t_4'' - t_4' &= 0,0238 \\ t_4 - t_4'' &= 0,0257, \\ \hline t_4 &= 0,2175 \end{aligned}$$

т. е. искомое время хода равно 0,2175 часа или 13,05 минуты.

Указанный на стр. 170 способ езды с $Q = 425$ был испробован во время опытов II цикла над паровозом К^у, при чем время хода во время поездки № 222 (16 ноября 1913 г.) получилось равным 13'33", а во время поездки № 276 (1 декабря 1913 г.) — 13'23", что отличается от расчетного менее чем на $\frac{1}{2}$ минуты.

§ 63. Способ Дедуи. Как было указано на стр. 120—121, Дедуи предложил вместо аналитического интегрирования уравнения движения поезда строить графически кривую

$$V = \varphi(t).$$

Поэтому применение его метода к определению времен хода сводится к построению таких кривых для участков, в пределах которых

$$f = w$$

является непрерывной функцией скорости.

Предположим, например, что нам надо определить время хода по z для перегона, состоящего из двух участков, имеющих виртуальные под'емы i_b и i_c . Пусть далее длина этих участков равна s_b и s_c и на обеих станциях, ограничивающих наш перегон поезд должен останавливаться. Применяя один из способов, указанных в §§ 46—47, строим прежде всего кривую

$$V = \varphi(t)$$

для участка с под'емом i_b . На фиг. 81 это построение произведено способом Дедуи—Лебедева (стр. 125) т. е. путем проведения прямых

$$OB_1 \perp b_1 a_1$$

$$B_1 B_2 \perp b_2 a_2$$

$$\dots\dots\dots$$

Построение это должно продолжаться до тех пор, пока $s - s_0$ не сделается равным s_b . Для определения времени

$$t_b = OM',$$

нужного для того, чтобы поезд, двигаясь по под'ему i_b , прошел путь s_b , можно, как было указано в § 48, воспользоваться двумя приемами: кривой

$$s = \chi(t),$$

или подсчетом площадей

$$OB_1 B'_1, B_1 B_2 B'_2 B'_1 \dots\dots\dots$$

Если при применении второго способа

$$OB_2B' < s_b < OB_3B',$$

как это показано на фиг. 81, то время $B_2M' = x$ и скорость $M'M = V_x$ можно найти из уравнений

$$\frac{x}{h} = \frac{V_x - V_2}{V_3 - V_2},$$

$$s_2 + \frac{V_2 + V_x}{2} x = s_b,$$

где

$$h = B_2B',$$

$$V_2 = B_2B_2,$$

$$V_3 = B_3B_3$$

и

$$s_2 = \text{пл. } OB_2B_2$$

известны из чертежа.

Полученное таким образом или определенное из кривой

$$s = \chi(t)$$

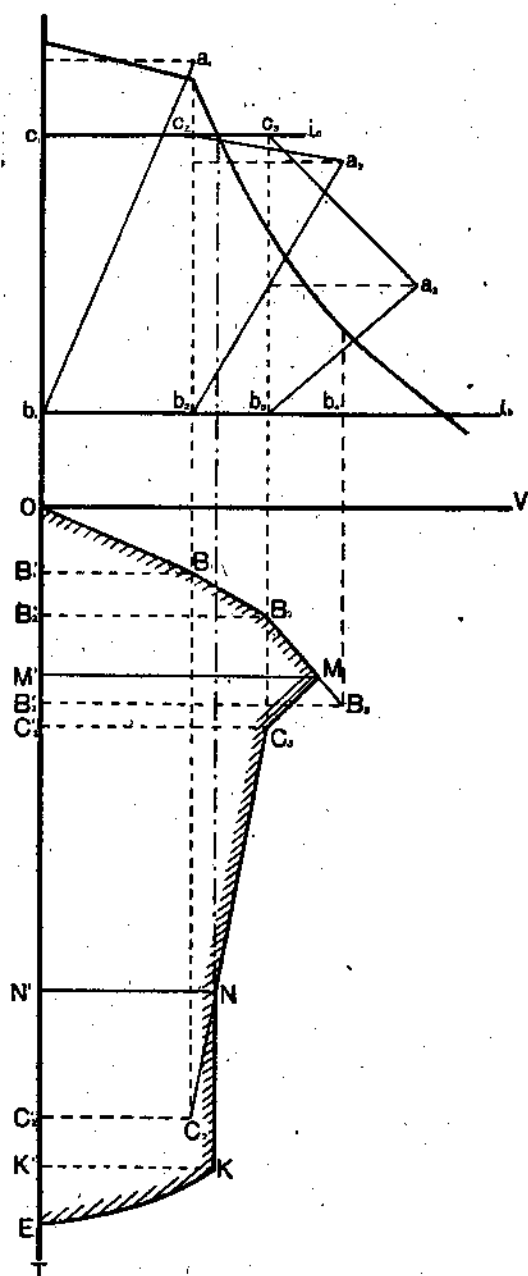
время t_b , нужное для прохождения участка с подъемом s_b можно рассматривать только как первое приближение, ибо при изменении скорости от V_2 до V_x среднее значение

$$f - w$$

будет изображаться не прямой a_3 , а некоторой прямой a_4 лежащей выше ее. Поэтому, найдя приблизительно точку M , необходимо затем

перестроить элемент B_2 по более точному значению $f - w$. На фиг. 81 это исправление не показано, чтобы не затемнять чертеж.

Фиг. 81.



С переходом в момент

$$t_b = OM'$$

на участок с подъемом

$$i_c > i_b$$

начало координат диаграммы

$$f-w = \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt}$$

переносится в c_1 , и потому для построения кривой

$$V = \varphi(t),$$

соответствующей этому участку, мы должны строить

$$MC_3 \perp c_3 a_3$$

$$C_3 C_2 \perp c_2 a_2$$

$$\dots\dots\dots$$

Такое построение надо вести до тех пор, пока не наступит момент, когда нужно закрывать регулятор и тормазить, чтобы остановиться у станции, или до тех пор, пока не будет достигнута равномерная скорость

$$V_b = N'N.$$

На фиг. 81 показан именно этот второй случай.

Построение тормазной кривой **EK** было подробно описано на стр. 154. Что же касается нанесения ее на фигуру 81, т. е. нахождения точки **K**, то для этого приходится прибегать к методу попыток, двигая кривую **EK**, начерченную на кальке, вдоль по чертежу, пока площадь **OMNKE** не сделается равной

$$s_a + s_b.$$

Эта операция при методе Дедуи является наиболее утомительной.

Искомое время на фиг. 81 выражается отрезком **OE**.

В заключение необходимо отметить, что при массовых расчетах, когда длина кривых

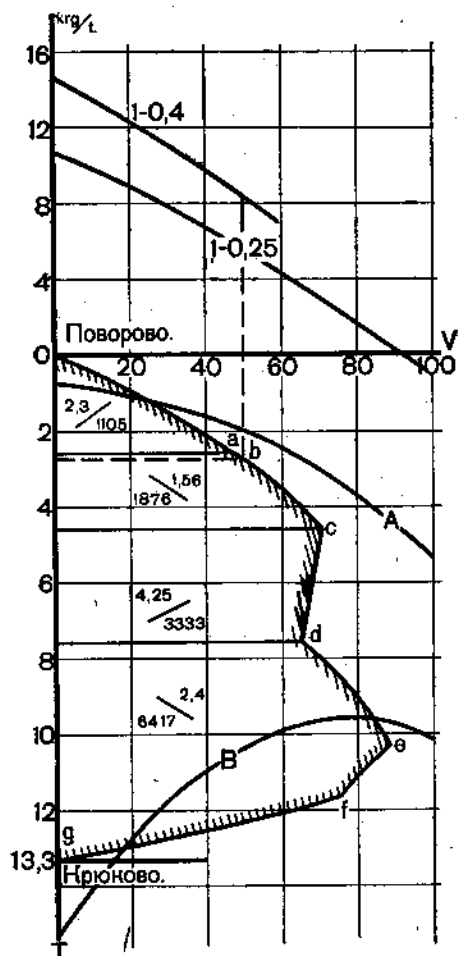
$$V = \varphi(t)$$

достигает нескольких метров, диаграмму $f-w$, т. е. верхнюю часть фиг. 81, приходится передвигать вдоль чертежа, для какой цели она вычерчивается отдельно на куске кальки или прочной клетчатки. А так как незначительный перекося этого куска может, очевидно, значительно отразиться на правильности построений,

то перекалывая его с места на место необходимо тщательно следить за совпадением осей $f-w$ и t . Этот переносный кусок кальки или клетчатки отнюдь не следует загрязнять проведением лучей ab и ac ; достаточно по ним установить треугольник (лучше всего прозрачный), и затем по другому треугольнику, прижатому к первому, прочертить соответственный элемент кривой

$$V = \varphi(t).$$

Пример 5. Требуется определить время хода дачного поезда на перегоне Поворово-Крюково, согласно заданиям, изложенным на стр. 168.



Фиг. 82.

раза приведена на фиг. 82. Здесь Oa соответствует езде по под'ему 2,3 на 1-0,4, ab по уклону 1,56 с той же комбинацией, bc по

При применении графических приемов нет уже надобности прибегать к каким либо допущениям относительно кривых

$$f-w = \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt},$$

как это нам приходилось делать на стр. 171-180. Иными словами при графических методах мы можем пользоваться не пунктирными, а сплошными кривыми фигур 77, 79-80. Эти кривые и перенесены на фиг. 82, где кривая A относится к движению без пара, а кривая B к торможению.

Строя затем, как было указано выше, диаграмму скорости в функции времени в масштабах

$$\begin{aligned} m &= 2, \\ k &= 10, \\ \xi &= 120, \\ A &= 50, \\ x &= 1200, \end{aligned}$$

мы получим кривую $Oabcdefg$, которая по уменьшению в 4

тому же уклону на 1—0,25, от—с этой комбинацией по уклону 2,4, ef по этому уклону без пара, а fg на тормазах.

Искомое время

$$T = 0g = 13,3$$

минуты. При аналитическом же расчете мы получили

$$T = 13,1,$$

а среднее из двух поездок

$$T = 13,5.$$

Сходимость более чем достаточная.

§ 65. Способ Липеца. Подобно тому как розыскание времени хода по способу Дедуи сводится к построению кривых

$$m = \varphi(t)$$

для тех участков, где $f-w$ является непрерывной функцией V , при способе Липеца эта задача сводится к построению для таких участков кривой

$$V = \psi(s),$$

и по ней кривой

$$t = \chi(s).$$

На фиг. 83 приведено построение первой из этих кривых для того же теоретического перегона, для которого на фиг. 81 мы строили

$$V = \varphi(t).$$

Именно, проводя

$$OB \perp b_1 a_1,$$

$$B_1 B_2 \perp b_1 a_2,$$

$$B_1 B_3 \perp b_1 a_3,$$

мы получаем кривую разгона на под'ем i_b . Кривая эта обрывается в точке M , для которой

$$OM' = s_b.$$

Проводя далее

$$MC_3 \perp c_1 a_3,$$

$$C_3 C_2 \perp c_1 a_2$$

до достижения скоростью значения

$$V_c = NN' = KK',$$

мы получим кривую

$$V = \varphi(s)$$

на подъеме i_c . Наконец, строя из точки E , в данном случае нам заданной условием

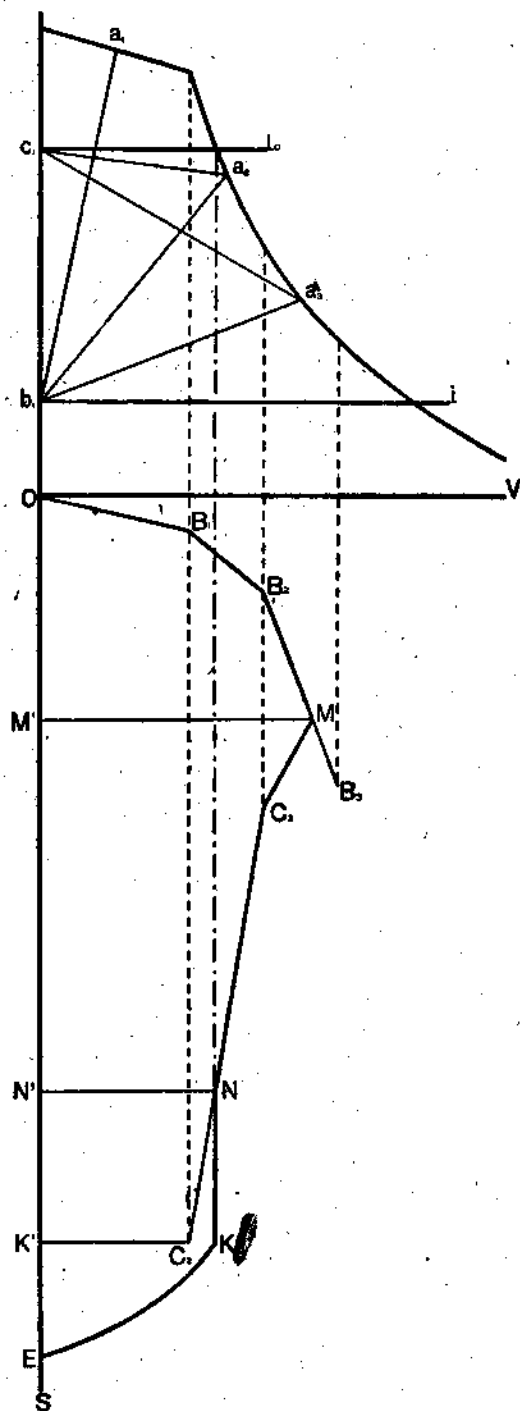
$$OE = s_b + s_c,$$

кривую торможения, как это было показано на стр. 160, мы получаем диаграмму

$$V = \psi(s)$$

для всего перегона.

К построению этой кривой по способу Липца применимы все те замечания практического характера, которые на стр. 184 и 185 мы сделали относительно способа Дедуи. Также как и при нем, если точка M , соответствующая переделу профиля, не совпадает с границей интервалов V , то интервал, внутри которого оказалась эта точка, надо уменьшить, и соответственно исправить направление элемента искомой кривой B_2M . Это исправление при способе Липца достигается значительно легче, чем при способе Дедуи, ибо здесь границы участков заранее известны, тогда как при способе Дедуи положение прямой MM' (фиг. 81) находится помощью подбора соответственной площади. Равным образом при применении способа Липца к массовым расчетам, диаграмму



Фиг. 83.

$$f-w = \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt},$$

как и при способе Дедуи приходится вычерчивать на отдельном куске кальки или клетчатки и двигать вдоль чертежа, избегая при этом загрязнения ее карандашом, и применяя для построения элементов кривой

$$V = \psi(s)$$

два треугольника.

По сравнению с способом Дедуи, способ Липеца имеет то неудобство, что при нем кроме кривой скоростей для нахождения времени хода приходится строить еще или кривую

$$t = \chi(s)$$

(стр. 143—144) или Дубелировскую кривую

$$\frac{1}{V} = \psi(s)$$

(стр. 142), площадь которой дает непосредственно искомое время хода. Надо, однако, сознаться, что отсутствие необходимости непрерывно подсчитывать площади и искать попытками начало торможения с избытком окупают указанное неудобство. Вследствие этого и для расчета времен хода способ Липеца приходится рекомендовать преимущественно перед способом Дедуи.

Пример 5. Определить по способу Липеца время хода дачного поезда на перегоне Поворово-Крюково, согласно заданиям, изложенным на стр. 168—169.

Как и при способе Дедуи (стр. 185) мы можем пользоваться сплошными кривыми фиг. 77, 79—80, перенесенными на фиг. 84. Применяя масштабы

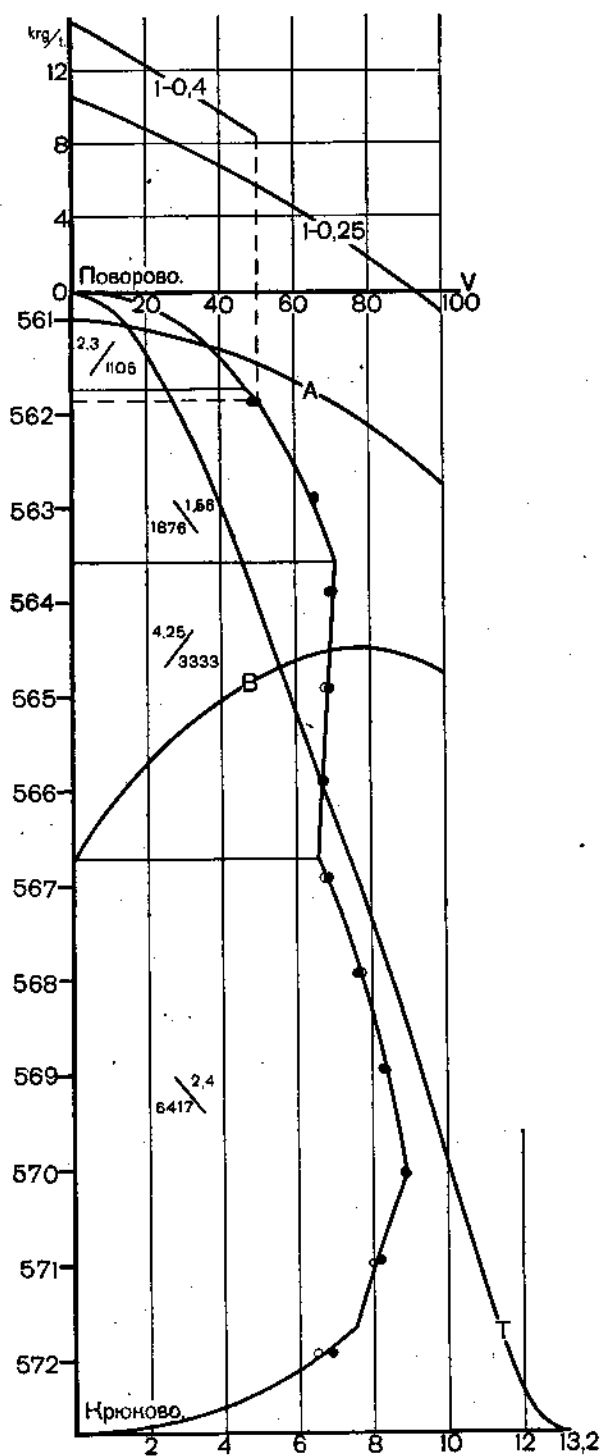
$$m = 2,$$

$$k = 10,$$

$$\bar{y}_s = 48,$$

$$x = 1200,$$

мы получим для нашего перегона кривые V и t , приведенные по уменьшению в 4 раза на фиг. 84. Кроме того на эту фигуру нанесены в виде белых кружков значения мгновенных скоростей при прохождении мимо верстовых столбов во время поездки № 222 (16 ноября 1913 г.) и в виде черных во время поездки



Φ42, 84.

№ 276 (1-го декабря того же года). Искомое же время

$$T = 13,2,$$

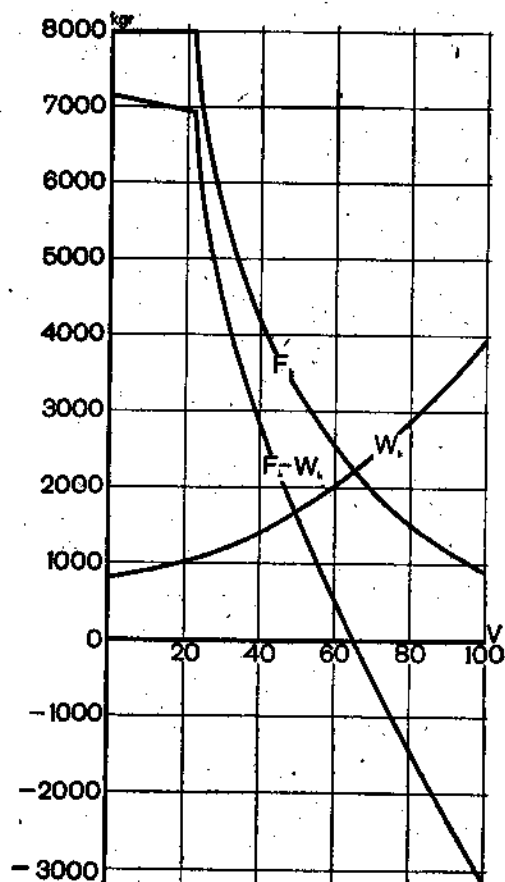
что хорошо согласуется, как с результатами наших расчетов (аналитический—13,1', Дедуи—13,3'), так и результатами опытных поездок (13,5').

Пример 6. Определить время хода дальнего скорого поезда весом $Q = 460$ тонн (№№ 5_c и 5_p) на участке Серпухов—Тула Московско-Курской ж. д. при паровозе 1—3—0 Н^у¹⁾ на нефти при условии, что остановки на этом участке он должен иметь на ст. Серпухов, Лаптево и Тула, что станции он должен проходить со скоростью не свыше 50 км/ч, мост через р. Оку на 98 вер.—не свыше 40 км/ч, а мост через р. Упу на 180 вер.—не свыше 30 км/ч. Профиль этого участка изображен на листе I, приложенном в конце книги.

В виду редких остановок и затяжных подъемов расчет блagоразумнее вести по z . Что же касается выбора этого z , то он определился следующими соображениями: опытами с паровозом Н^у было выяснено, что при $z = 50 - 60$ кгг/м²ч парообразование на этом паровозе еще вполне надежно. При снятии же с 1 м² поверхности нагрева больше 60 кгг пара в час, мы имели несколько случаев течи труб и при той форсунке, которая была поставлена на паровозе согласно утвержденного чертежа, значительное ухудшение горения нефти, т. е. много сажи и окиси углерода. Таким образом подымать z выше 60 кгг/м²ч представляется неблагоприятным в смысле обеспеченности своевременного следования поезда. Более того для возможности выдерживать время хода при плохой погоде и мелких неисправностях в паровозе, а при хорошей погоде иметь возможность нагонять опоздания, z желательно брать несколько менее 60. С другой стороны значительное понижение z отразилось бы неблагоприятно на коммерческой скорости; и при $z = 40$, которая при нефти, как указано в таблице VI (стр. 43), является наинизшей коммерчески выгодной для этого паровоза форсировкой котла, время хода на рассматриваемом участке оказалось бы больше, чем оно поддерживалось в течение целого ряда лет для подобных поездов паровозами 2—3—0 В системы Воклена. Между тем для экономичес-

¹⁾ Двухцилиндровый компаунд: $d_1 = 500$ мм; $d_2 = 750$ мм; $l = 650$ мм; $D = 1900$ мм; $pk = 13$ кгг/см²; $H = 156,8$ м²; $G = 2,6$ м³; $P_k = 48$ т; $P = 100$ т; (тендер четырехосный).

кой жизни страны увеличение коммерческой скорости движения пассажирских поездов для таких пробегов, как Петроград—Севастополь и Петроград—Ростов, имеет серьезное значение. Поэтому в данном случае от паровоза надо взять все, что он может дать, без риска, однако, вызвать нарушение правильности движения при плохой погоде и мелких неисправностях паровоза. В силу этих соображений остановимся на $z = 50$.



Фиг. 85.

Силу тяги паровоза 1-3-0 НУ для $z = 50$ берем из „паспорта“; она имеет вид, показанный на фиг. 85. Значения ее ординат переносим в таблицу XVIII, где затем производим подсчет значений сопротивления поезда, как ряда повозок на площадке

$$W_0 = W_p' + W_0'' = Pw_0' + Qw_0''$$

по формулам

$$w'_0 = 1,3 + 0,02 V + 0,0005 V^2$$

(стр. 82) и

$$w''_0 = 1,5 + 0,5 V \frac{V+10}{1000}$$

Таблица XVII. 1-3-0. Н'. Q=460.

V	При открытом регуляторе							При закрытом				
	F_k	w'_0	$W'_0 = Pw'_0$	w''_0	$W''_0 = Qw''_0$	$W = W' + W''_0$	$F_k - W_0$	$f_k - w_0$	$w'_0 + w'_m$	$W'_m = P(w'_0 + w'_m)$	$W'_m + W''_0$	w'_i
0	8000	1,30	180	1,50	690	820	7180	12,84	13,00	300	990	1,77
10	8000	1,55	155	1,60	736	891	7109	12,68	3,47	347	1083	1,94
19	8000	1,86	186	1,78	818	1004	6996	12,49	—	—	—	—
20	7700	1,90	190	1,80	828	1018	6682	11,94	4,14	414	1242	2,22
30	5650	2,35	235	2,10	966	1201	4449	7,95	5,09	509	1475	2,64
40	4250	2,90	290	2,50	1150	1440	2810	5,02	6,39	639	1789	3,20
50	3250	3,55	355	3,00	1380	1735	1515	2,71	8,13	813	2193	3,92
60	2550	4,30	430	3,60	1656	2086	464	0,83	10,87	1087	2693	4,81
70	2000	5,15	515	4,30	1978	2493	-493	-0,88	13,10	1310	3288	5,88
80	1500	6,10	610	5,10	2346	2956	-1456	-2,60	16,69	1669	4015	7,18
90	1050	7,15	715	6,00	2760	3465	-2415	-4,31	20,94	2094	4854	8,67
100	750	8,30	830	7,00	3220	4050	-3300	-5,90	26,00	2600	5820	10,55

(стр. 76), а также значения полного сопротивления поезда при закрытом регуляторе

$$W'_i = (w_0 + w'_m) P + w''_0 Q,$$

вычисленные по формуле

$$w_0 + w'_m = 3,0 + 0,04 V + 0,0006 V^2 + 0,000013 V^3,$$

полученной для паровоза 1-3-1 С. Значения W_0 и $F_k - W_0$ нанесены также на фиг. 85.

Делим теперь значения $F_k - W_0$ и W'_t на $P + Q$ и получаем кривые

$$f_k - w_0 = f(V)$$

и

$$w'_t = f'(V),$$

по которым и ведем построения кривых

$$V = \psi(s)$$

и

$$t = \chi(s),$$

представленных на листе I, приложенном в конце этой книги. Значение изображенной там заштрихованной кривой расхода пара будет объяснено в следующей главе.

На этом же листе в виде точек нанесены значения скоростей и времен хода, полученные во время опытной поездки II цикла № 36 22 ноября 1912 г. Эта поездка, помимо плохой погоды, интересна тем, что во время ее на паровозе № 133 имелся уже значительный пропуск пара через правый цилиндрический золотник весьма неудачной конструкции. Пропуск этот был настолько велик, что через одну поездку, после рассматриваемой, паровоз пришлось отставить от „опытной“ службы для ремонта. Следует думать, однако, что в повседневной службе ходят много паровозов этой серии и с большим пропуском. Несмотря на этот пропуск и на не вполне точное соблюдение скоростей, назначенных на мостах и станциях, совпадение кривых надлежит признать достаточным, особенно если иметь в виду, что расчет велся по z , машинист же не имел ни указаний поддерживать его по возможности постоянным, ни определенной программы управления паровозом, как это имело место при опытных поездках на перегоне Поворово-Крюково, а ехал нормально, сообразуясь лишь с общими указаниями опытов I цикла о наивыгоднейших комбинациях. Нас, однако, сейчас интересует не столько сходимость кривых

$$V = \psi(s),$$

которая при указанных условиях и не могла быть полной, сколько общий результат определения времени хода. По кривой листа I

$$T = 109,5',$$

действительное же

$$T = 111,5',$$

а по действующему расписанию М.-Курской ж. д.

$$T_p = 115'.$$

Таким образом, несмотря на пропуск через золотник и плохую погоду, мы имели против расчета по z опоздание всего лишь в 2' или 1,8%. Да и оно главным образом объясняется приемом опытного поезда в Туле с проводником на товарные пути.

Результат этот, после всего сказанного на стр. 45, не является неожиданным. Но с другой стороны нельзя не признать, что произведенное сравнение расчета по

$$z = 50$$

с результатами поездки, при которой это условие вовсе не соблюдалось, едва ли может служить для оценки точности способа Липеца в приложении к расчету времен хода. Для этой цели можно сравнивать только результаты, полученные фактически и из расчета при одних и тех же заданиях относительно изменений машинистом силы тяги. А так как во время опытных поездок все изменения в положении регулятора и переводного механизма записываются, то представляется возможным построить по способу Липеца кривые скоростей и времен по тем именно отсчеткам, которыми машинист фактически пользовался. Это и исполнено на листе I пунктиром из одних точек. В результате такого расчета мы получили

$$T = 111,1'$$

что отличается от действительного

$$T = 111,5',$$

всего на 0,4' или 0,36%. Такое совпадение указывает с одной стороны, как этого и следовало ожидать, на весьма слабое влияние пропуска через золотник на силу тяги паровоза, а с другой — на полную применимость способа Липеца для самых деликатных расчетов.

В заключение в таблице XVIII приведены значения времен хода по отдельным перегонам нашего участка, вычисленные обоими

Таблица XVIII.

Станция	по z	по ε	поездка № 36
Серпухов	—	—	—
Ока	6,4	7,2	7,3
Свинская	12,3	12,1	12,3
Тарусская	18,8	18,0	17,8
Пахомово	16,4	16,4	16,6
Шульгино	6,5	6,7	6,7
Лаптево	13,6	13,5	13,1
Ревякино	17,4	18,9	18,9
Хомяково	7,9	7,7	7,7
Тула	10,2	10,6	11,1
Итого . .	109,5	111,1	111,5

способами и наблюдавшиеся во время опытной поездки № 36.

Пример 7. Определить время хода товарного полногрузного поезда весом 61 000 пудов = 1000 тонн по перегонам Горовастипа Черный Дор-Осташков Полоцкой линии Ник. ж. д. при паровозе типа 0-4-0 серии Ы Армавир-Туапсинской ж. д.¹⁾ на нефти.

При цене нефти около 50 коп. за пуд и отсутствии специализации товарного движения на Полоцкой линии, благодаря чему увеличение ходовой скорости очень слабо отражается на коммерческой, берем для z минимальную цифру, стоящую в таблице VI (стр. 43), т. е. $z=25$. Для этого z берем из «паспорта» кривую

$$F_k = \varphi_k(z, V),$$

и, разделив ее ординаты на

$$P + Q = 1100,$$

¹⁾ Двухцилиндровый компаунд с очень высоким перегревом (350–400° C); $d_1=550$ мм, $d_2=790$ мм, $l=650$ мм, $D=1200$ мм, $p=12$ кг/см²; испаряющая поверхность нагрева $H=147,3$ м², полная включая и перегреватель $H+H_2=190,3$ м², $G=2,55$ м³; сцепной вес $P_k=61$ т, расчетный вес $P=100$ т.

получаем кривую f_k фигуры 86.

Переходя к сопротивлению, воспользуемся для паровоза Ы¹ формулой

$$w'_0 = 1,4 + 0,04 V + 0,0006 V^2,$$

полученной для него путем скатывания, а для вагонов формулой Х.Н. ж. д.

$$w''_0 = 1,4 + \left(0,04 + \frac{20}{q}\right) V,$$

которая для полногрузных вагонов, т. е. для

$$q = 420 + 1000 = 1420,$$

превращается в

$$w''_0 = 1,4 + 0,054 V.$$

В результате для всего поезда мы имеем формулу

$$w_0 = \frac{Pw'_0 + Qw''_0}{P + Q} =$$

$$= 1,4 + 0,0527 V + 0,000545 V^2,$$

которая, как это видно из фигуры 86, очень мало отличается от формулы завода Балдвина

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20},$$

изображенной там пунктирной прямой В. Для полного же сопротивления паровоза при закрытом регуляторе принимаем формулу

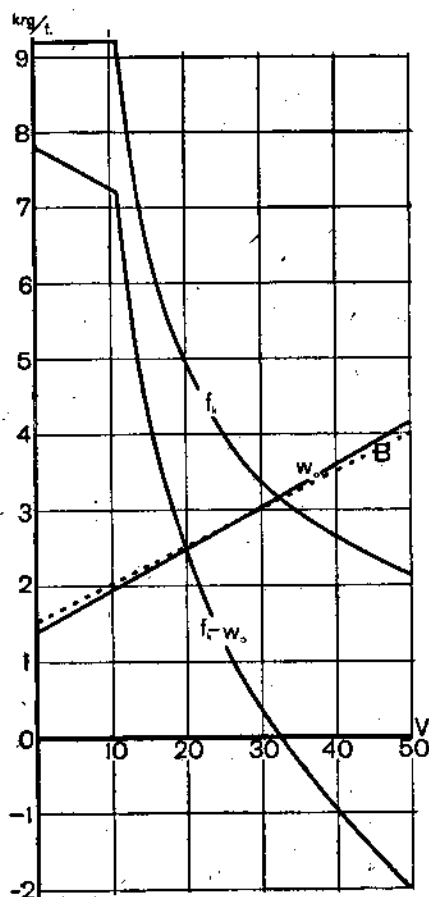
$$w'_0 + w'_m = 4 + 0,16 V + 0,002 V^2,$$

найденную опытным путем для паровоза нормального типа.

Пользуясь этими данными и профилем расчетного перегона, показанного на листе II, приложенном к этой книге, строим, как было указано выше, кривые

$$V = \psi(s)$$

$$t = x(s).$$



Фиг. 86.

Для товарных поездов,двигающихся обычно со скоростями 20—30 вер./час, употреблявшиеся нами раньше масштабы оказываются слишком мелкими, и потому в данном случае мы берем

$$m = 5$$

$$k = 40$$

$$x = 600$$

$$y = 75.$$

Полученные кривые по уменьшению в 5 раз приведены на листе II, куда также нанесены кривые скоростей и времен, полученные при трех опытных поездках, во время которых машинист, пользуясь абсолютно наивыгоднейшими комбинациями, стремился выдержать определенное расчетом время. В общем это ему вполне удалось, ибо среднее время хода за 3 поездки

$$T = 88,3'$$

только на $1\frac{1}{2}\%$ отличается от расчетного

$$T = 87'.$$

Но зато, благодаря абсолютно наивыгоднейшим комбинациям, средняя интенсивность парообразования за эти поездки получилась равной всего $21,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, что на 14% меньше $z = 25$, принятого при расчете. Если же бы, наоборот, машинист выдерживал условие

$$z = 25,$$

то, конечно, время хода получилось бы меньше расчетного, как это мы предвидели на стр. 45.

Что же касается сходимости между расчетной и действительными кривыми

$$V = \psi(s),$$

то ее следует признать вполне удовлетворительной, особенно если иметь в виду крупный масштаб скоростей, подчеркивающий даже незначительное различие между этими кривыми.

§ 65. Обыкновенный графо-аналитический способ. Наряду с другими приемами расчета времен хода, приближенный графо-аналитический метод пользуется у нас наибольшим распространением, что дало Чечотту¹⁾ право назвать его «обыкно-

¹⁾ Чечотт. Новый метод . . . стр. 70.

венным» Основанием этого способа является предположение, что на каждом элементе пути однородного профиля поезд движется равномерно с той скоростью, к достижению которой он стремится на данном под'еме, т. е. при которой

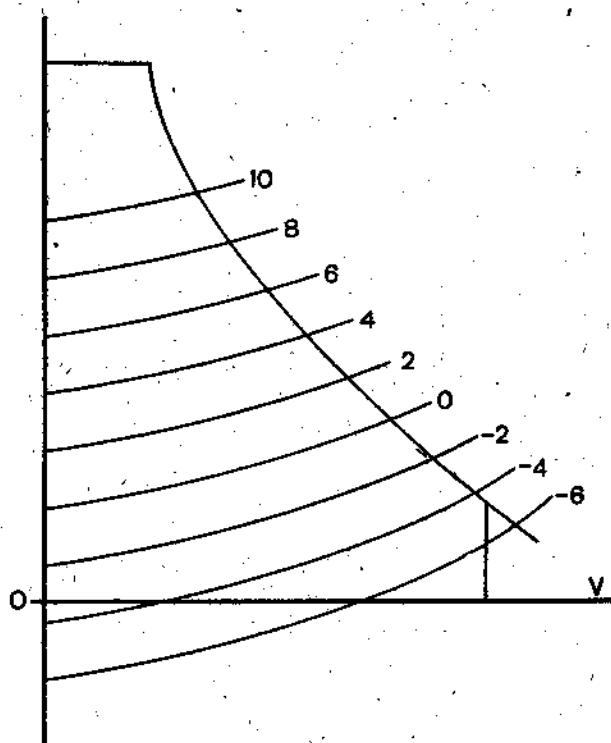
$$f = w_0 + i_k \quad \dots \dots \dots \text{Пу}$$

Для нахождения этих скоростей на один планшет наносят кривые f и $w = w_0 + i_k$ для разных i_k , как положительных, так и отрицательных. Это и есть графическая часть расчета, в дальнейшем же он ведется чисто аналитически. Именно, определив скорости, соответствующие пересечению кривых f и w , по ним подсчитывают времена

$$t = \frac{s}{V},$$

нужные для прохождения данного элемента пути, и затем время хода по перегону

$$T = \sum \frac{s}{V} + \Sigma \tau, \quad \dots \dots \dots 63$$



Фиг. 87.

где $\Sigma \tau$ поправка на неравномерность движения, о которой будет речь ниже.

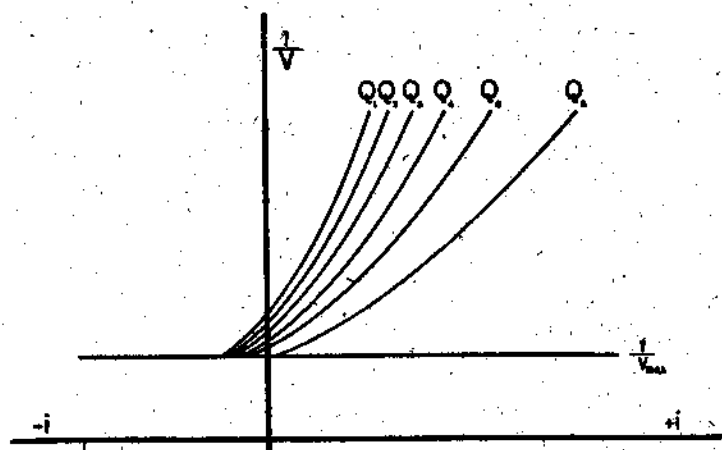
Надо иметь, однако, в виду, что нанести на диаграмму фиг. 87 значения всех под'емов, встречающихся при массовых расчетах, очень трудно и неудобно, в смысле затемнения чертежа. Гораздо практичнее поэтому на основании подобного чертежа построить диаграмму

$$V = \varphi(i_k),$$

или еще лучше диаграмму

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k);$$

при этом на один планшет можно нанести значения, соответствующие целому ряду составов Q , как это и сделано на фиг. 88.



Фиг. 88.

отчего наглядность ее ничуть не уменьшилась. Самые же расчеты удобнее всего вести на печатных бланках следующей формы,

1	2	3	4	5	6	7	8
НАЗВАНИЕ СТАНЦИИ	Длина эл- мента пути	Профиль	60/V минут на 1 версту	$t = \frac{s}{V}$	Σt	τ	T
Ст. А.	s_1	i_1					
	s_2	i_2					
	s_3	i_3					
Ст. Б.	s_4	i_4					
	s_5	i_5					
	s_6	i_6					
	s_7	i_7					
	s_8	i_8					
Ст. В.							

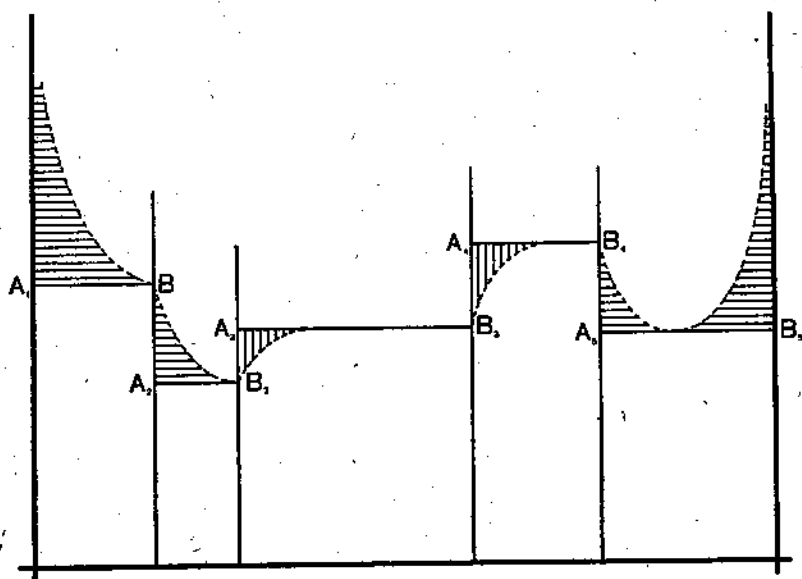
где значения s и i_k , а также станции отпечатаны заранее. На этих бланках при расчете прежде всего нужно заполнить графу 4, беря значения из фиг. 88; затем перемножить эти значения с соответственными s и, наконец, сложить полученные t между собой и с поправками τ .

Переходим теперь к величине этих последних. Нетрудно понять, что точность рассматриваемого метода определяется именно правильным выбором значений этих поправок. Если бы мы сумели определять их вполне точно, то формула

$$T = \sum \frac{s}{V} + \sum t \quad 63$$

давала бы тоже вполне точное время хода, и рассматриваемый способ ничем не уступал бы другим способам, например, способам Дедуи и Липеца. Это обстоятельство заставляет нас изучить более подробно природу этих поправок, что всего удобнее сделать при помощи кривой Дубелира

$$\frac{1}{V} = \psi(s).$$



Фиг. 89.

Если бы действительно скорость поезда мгновенно менялась со вступлением его на элемент пути другого профиля, то кривая Дубелира имела бы вид, показанный на фиг. 89 сплошными пря-

мыми; в действительности же эта кривая имеет вид, показанный пунктиром. Площадь этой последней есть истинное время T , а сумма площадей прямоугольников AB есть

$$\sum \frac{s}{V}.$$

Поэтому на этой фигуре Σt изображается суммой заштрихованных площадок, из которых каждая является поправкой на переход от одной равномерной скорости к другой. Положительные поправки на фигуре 89 отмечены горизонтальной штриховкой, а отрицательные вертикальной.

Всматриваясь в эту фигуру, мы можем сделать следующие заключения о природе поправок τ :

- 1) При переходе от меньшей равномерной скорости к большей поправки τ положительны (A_1B_1, B_1A_2, B_4A_5).
- 2) Напротив, при переходе от больших скоростей к меньшим поправки τ отрицательны (A_3B_2, A_4B_3).
- 3) Исключения составляют лишь поправки при подходе к станциям или предупреждениям, т. е. поправки на искусственное понижение скорости, — они (B_5) всегда положительны.

Кроме того, изучение значений поправок τ на большем числе примеров дало Липецу¹⁾ право высказать еще два замечания относительно этих поправок, а именно:

- 4) С точностью, достаточной для практических целей, можно считать, что поправка на ускорение от любой скорости V_n до любой скорости V_m равна взятой с обратным знаком поправке на замедление от V_m до V_n . Отсюда следует, что на фиг. 89

$$\text{пл. } A_4B_3 = \text{пл. } B_4A_5.$$

- 5) С точностью, достаточной для практических целей, можно считать, что поправка на переход от любой скорости V_n до любой скорости V_m не зависит от того, совершился ли этот переход сразу или через ряд промежуточных равномерных скоростей, иными словами на фиг. 90

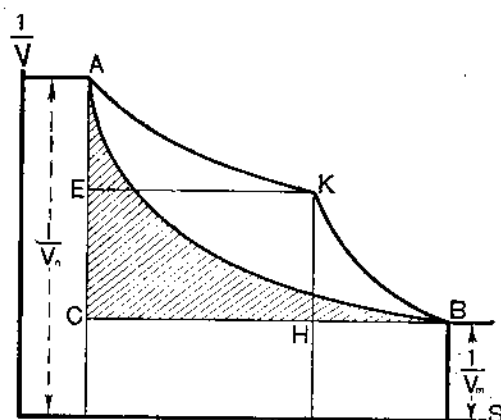
$$\text{пл. } ABC = \text{пл. } AKE + \text{пл. } KBH.$$

Из двух последних положений Липеца следует, что сумма всех поправок τ на перегоне, за исключением поправок на разгон и подход к станции, равна поправке на переход от скорости, с которой поезд стремится идти равномерно по первому элементу

¹⁾ Протоколы XXIX Сов. Съезда сл. тяги, стр. 331.

пути, до равномерной скорости, характерной для последнего элемента. Назовем эту поправку через τ_e ; поправку на разгон через τ_0 ; а поправку на подход к станции через τ_n . Тогда для любого перегона

$$\Delta\tau = \tau_0 + \tau_n + \tau_e; \quad \dots \quad 64a$$



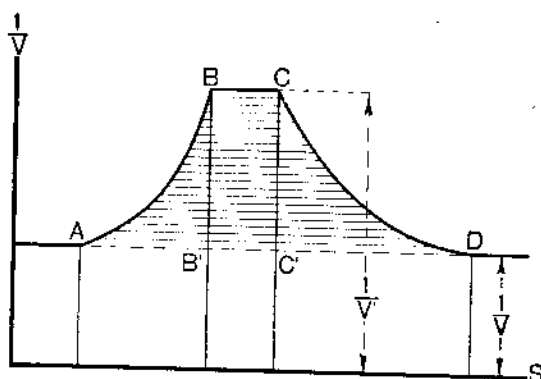
Фиг. 90.

причем, если обе станции расположены на одинаковом под'еме, то

$$\tau_e = 0.$$

Если же на перегоне, как показано на фиг. 91, есть предупреждение, то

$$\Delta\tau = \tau_0 + \tau_n + \tau_e + \tau'; \quad \dots \quad 64b$$



Фиг. 91.

причем

$$\tau' = \text{пл. } ABCD.$$

Нетрудно убедиться, что

$$\tau' = \tau_n + \left(\frac{1}{V'} - \frac{1}{V} \right) s' + t'_0,$$

где

$$t'_n = \text{пл. } ABB'$$

есть потеря времени на замедление перед предупреждением,

$$t'_0 = \text{пл. } CC'D$$

на разгон после него, а

$$\left(\frac{1}{V'} - \frac{1}{V} \right) s' = \text{пл. } BCC'B'$$

на следование по участку

$$BC = s',$$

огражденному сигналами, с назначенной скоростью V' вместо скорости V , с которой поезд стремится двигаться равномерно по данному профилю. Поэтому

$$\Sigma \tau = \tau + \tau_0 + t'_0 + \tau_n + t'_n + \tau_c + s' \left(\frac{1}{V'} - \frac{1}{V} \right) \quad . . . \quad 64$$

На всех русских дорогах, кроме линии Петроград—Москва, большинство станций расположено на площадках; предупреждения же у нас вводятся в расписания лишь в исключительных случаях. Поэтому, если предположения Липеца (п. 4 и 5, стр. 201) верны, то для подавляющего большинства случаев

$$\tau_c = t' = 0 \quad \quad 65$$

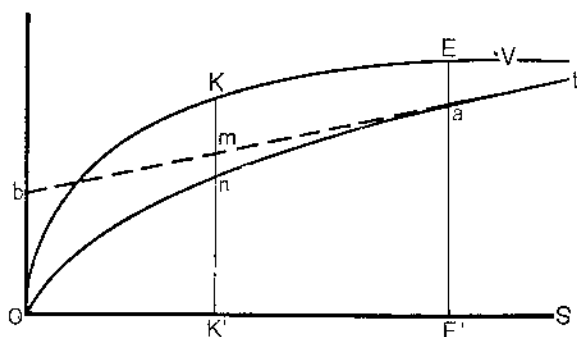
и

$$\Sigma \tau = \tau_0 + \tau_n, \quad \quad 64a$$

т. е. определение поправки $\Sigma \tau$ сводится к определению потери времени на разгон от нуля до равномерной скорости, с которой поезд данного веса стремится двигаться по площадке, и на замедление от этой скорости до нуля. При вычислении этой последней поправки, для пассажирских поездов надо брать ϑ около 0,1, а для товарных торможение только одного тендера, так как правильная остановка поезда, особенно у водоразборного крана, возможна только при медленном подходе. В общем же случае, при пользовании формулой 64, приходится еще вычислять поправки на предупреждения и на расположение станции на под'емах.

Что касается самого процесса вычисления поправок, то его удобнее всего вести, как показано на фиг. 92, по способу Липеца—

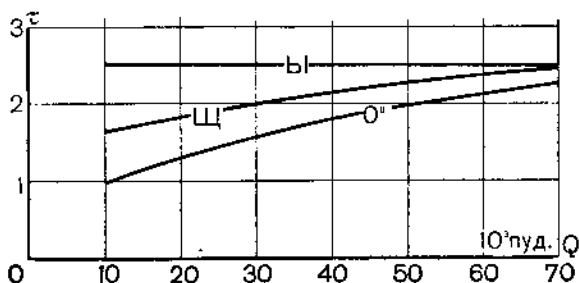
Лебедева, при котором величина τ_0 определяется, как отрезок Ob , отсекаемый на оси времен продолжением прямолинейного участка кривой t , т. е. участка ее, соответствующего установившейся скорости EE' . Интересно отметить, что из той же фигуры мы мо-



Фиг. 92.

жем определить и поправку на разгон до скорости EE' от любой скорости KK' ; она выражается отрезком mn .

Таким способом и были определены приведенные на фиг. 93 поправки τ_0 для груженных товарных поездов разного веса, при паровозах O^H , $Б$ и $Ц^1$). Что же касается поправок на остановку

Фиг. 93. Поправки на разгон; $i_k = 0$.

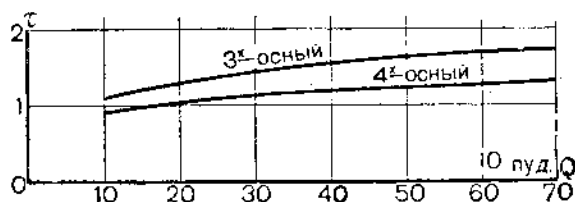
товарных груженных поездов, то они даны на фиг. 94 для 3 и 4-осного тендера. Для порожних поездов значения τ_0 и τ_n , приведенные на этих фигурах, надо увеличить $\frac{9}{10}$ на 10, ибо, как мы видели на стр. 14, порожний поезд примерно на столько инертнее груженого.

Судя по фигурам 93–94, с точностью, достаточной для целей практики, можно считать, что для товарных поездов

$$\tau_0 + \tau_n = 4'.$$

¹⁾ O^H — паровоз 0-4-0 нормального типа, $Б$ 0-4-0 типа Армавир-Туапсинской ж. д., а $Ц$ 1-4-0 измененного китайского типа.

как это обычно и принимается. Надо, однако, отметить, что при подходе к водоразборной колонне или при трогании с места „за-

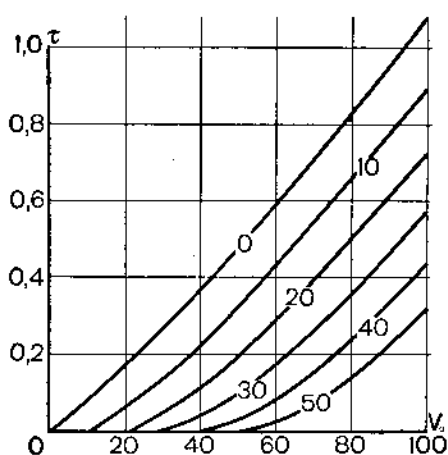


Фиг. 94. Поправки на остановку; $i_k = 0$.

стоявшегося“ поезда (стр. 84) значение этой поправки получается значительно больше.

Что же касается пассажирских поездов, то для них поправку τ_0 надежнее находить построением; поправку же τ_n можно брать из фиг. 95, дающей ее значения при $\vartheta = 0,1$ на площадке не только для конечной скорости, равной нулю, но для случаев замедления поезда от V_0 до скоростей, равных 10, 20, 30, 40 и 50 km/h (каждой такой скорости соответствует отдельная кривая).

В заключение необходимо отметить, что поправки τ_0 и τ_n необходимо определять, исходя из значений равномерных ско-



Фиг. 95. $\vartheta = 0,1$; $i_k = 0$.

ростей, характерных для данного профиля, совершенно не считаясь с тем, достигаются ли эти скорости в действительности или нет. Дело в том, что мы ищем поправки ко времени хода, определенному по сплошным прямоугольникам фиг. 89, не имеющим никакого реального значения, и потому при расчете τ должны считаться только со скоростями, соответствующими там прямым A_1B_1 и A_2B_2 , а не с тем, что имеется в действительности.

Пример 5. Определить время хода дачного поезда по переезду Поворово-Крюково согласно задания, изложенного на стр. 168.

При решении этой задачи тремя предыдущими способами мы вели расчет по отсечкам, т. е. силу тяги брали по кривым:

$$F_k = \varphi(Q, \epsilon, V):$$

именно при $V < 50$ мы задавались комбинацией $1-0,4$, а при $V > 50$ $1-0,25$. При таких условиях и $V_{max} = 100$ диаграмма

$$f_k - w_0 = f_0(V)$$

имеет вид, показанный на фиг. 96 сплошными линиями, перенесенными без изменения с фиг. 82—84. Можно, конечно, и в этом случае вести расчет по z , а именно по

$$z = 47$$

(см. стр. 169); тогда диаграмма $f_k - w_0$ примет вид, указанный на фиг. 96 пунктиром. Кривая эта построена на основании пунктирной кривой F_k фиг. 76 совершенно так же, как на фиг. 86 мы строили подобную кривую для паровоза Б".

В виду того, что на нашем перегоне имеется всего 3 перелома профиля, в построении диаграммы

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k)$$

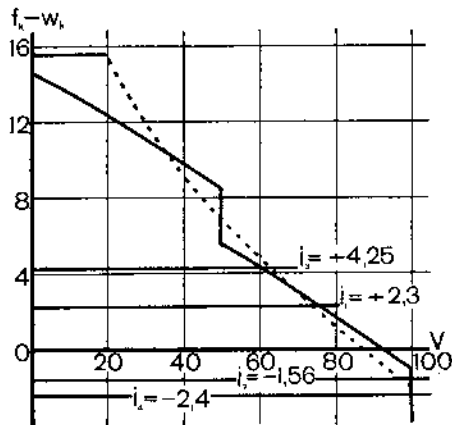
(см. фиг. 88 на стр. 199) нет надобности. Значения же равномерных скоростей, характерных для 4 элементов нашего профиля (см. фиг. 78 на стр. 173), мы находим проведением горизонтальных прямых

$$f_k - w_0 = i_k.$$

как показано на фиг. 96. Значение этих скоростей приведено в таблице XIX; там же показаны и значения $60/V$, т. е. числа минут, нужных для прохождения 1 километра.

Таблица XIX. Поворово-Крюково. К^у. Q = 425.

№ участка	i_k	По отсечкам		По $z = 47$	
		V	$\frac{60}{V}$	V	$\frac{60}{V}$
1	2,30	75	0,8	74,0	0,82
2	-1,56	100	0,6	96,6	0,62
3	+4,25	60	1,0	62,5	0,96
4	-2,40	100	0,6	100,0	0,60



Фиг. 96. К^у. Q = 425.

На основании этих данных можно заполнить бланк расчета, приведенный на стр. 199, как это и исполнено в таблицах XX и XXI. Приведенная в них форма бланков и заголовков выработана практикой Ташкентской и Николаевской ж. д. и принята на опытах над типами паровозов.

Таблица XX.

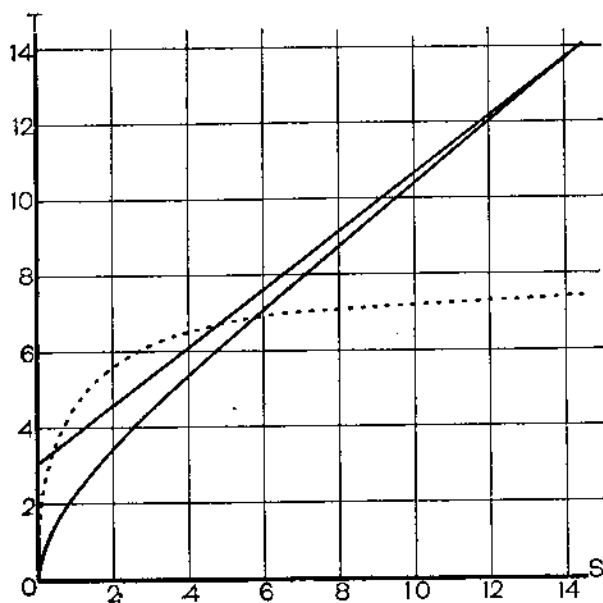
¹⁾ Поезд: дачный. Вес паровоза с тендером $P = 115$ Паровоз типа: КУ. Вес вагонов $Q = 425$ Принято при расчете: $V < 50 \text{ } 1 - 0,4; V > 50 \text{ } 1 - 0,25$ $w'_0 = 1 + 0,03V + 0,0004V^2$ $w''_0 = 1,5V + 0,5V \frac{V + 100}{1000}$								
Остановочные пункты	Длина эле- мента s	Виртуальный подъем i_k	60 минут на V 1 километр	60 s V Время $t = \frac{60s}{V}$	Σt	Прибавка τ	Полное вре- мя T	Примечания
Поворово	1105	2,30	0,80	0,89	9,2	4,1	13,3	
	1876	—1,56	0,60	1,13				
	3333	4,56	1,00	3,33				
	6417	—2,40	0,60	3,85				
Крюково								

Таблица XXI.

¹⁾ Поезд: дачный $P = 115$ Паровоз типа: КИ $Q = 415$ Принято при расчете: $s = 47$ $w'_0 = 1 + 0,03V + 0,0004V^2$ $w''_0 = 1,5 + 0,5V \frac{V + 100}{1000}$								
Остановочные пункты	s	i_k	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	Σt	τ	T	Прим.
Поворово	1105	2,30	0,82	0,91	9,1	4,1	13,2	
	1876	—1,56	0,62	1,16				
	3333	4,56	0,96	3,20				
	6417	—2,40	0,60	3,84				
Крюково								

¹⁾ Название дороги или учреждения, производившего расчет.

Что же касается поправок τ , приведенных в этих таблицах, то поправка на разгоне τ_0 определена графически, как показано на фиг. 97, из условия разгона на подъем $i_k = 2,3$ от O до $V = 73$, с которой наш поезд стремится идти по этому подъему равномерно;



Фиг. 97. К^в. ($q = 425$).

а поправка на остановку взята из фиг. 95. На это можно возразить, что там приведены поправки на остановку на площадке, станция же Крюково расположена на уклоне в $2,4\text{‰}$. Однако, если принять во внимание, что при торможении всего поезда даже усилием, соответствующим $\vartheta = 0,1$, сопротивление от тормозов плюс w_0 составляет 20–30 кг на тонну, то едва ли можно ожидать, чтобы уменьшение этого сопротивления на 2 кг заметно изменило результат.

Возвращаясь к полученным в таблицах XX–XXI временам хода, мы видим, что разница между результатами расчета по z и по комбинациям в данном частном случае менее 1% . Но особенно интересно то обстоятельство, что времена хода, полученные обыкновенным способом, в данном случае лежат, как показывает таблица XXII, в пределах тех цифр, которые мы получили, интегрируя уравнение движения поезда разными способами.

¹⁾ Пунктиром на этой фигуре нанесена кривая скоростей в масштабе 1 mm = 2 км/ч, т. е. одна клетка — 20 км/ч.

Таблица XXII. Поворово—Крюково. К%. $Q = 425$.

СПОСОБЫ	T
Аналитический	13,1
Дедуи	13,32
Липеца	13,23
Обыкновенный по z	13,2
Тоже по комбинациям	13,3
Среднее из 2 поездок	13,5

Можно, однако, предполагать, что такое совпадение объясняется в значительной степени малыми колебаниями скорости нашего поезда на перегоне; а это в свою очередь обуславливается сравнительно ровным профилем его и большой средней скоростью. Поэтому представляется особенно интересным посмотреть, насколько сойдутся времена хода, определенные обыкновенным способом и более точными, для примеров 6 и 7.

Пример 6. Определить времена хода скорого поезда на участке Серпухов—Тула согласно с заданиями, изложенными на стр. 190.

Разделяя ординаты фиг. 85 (стр. 191) на

$$P + Q = 560,$$

мы получаем диаграмму

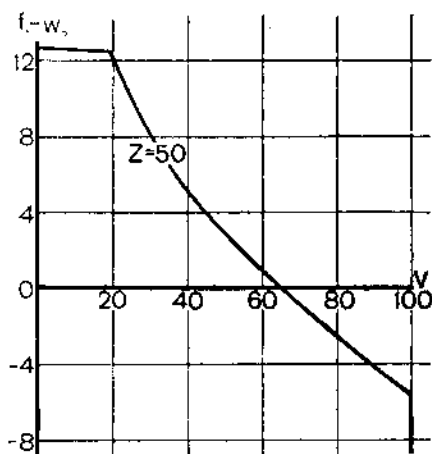
$$f_k - w_0 = f_0(V)$$

для паровоза Н^у при $Q = 460$, изображенную на фиг. 98. Пересекая ее затем рядом горизонтальных прямых

$$f_k - w_0 = i_k,$$

определяем для разных i_k значения равномерных скоростей V и по ним строим кривую

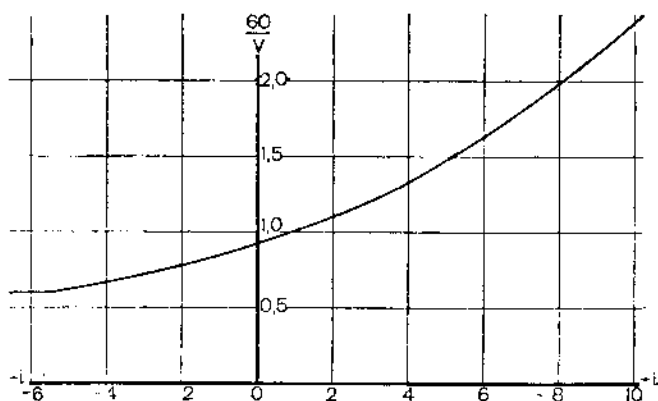
$$\frac{60}{V} = \psi(i_k),$$

Фиг. 98. Н^у; $Q = 460$.

изображенную на фиг. 99.

Пользуясь этой кривой и профилем, мы можем, как показано в табл. XXII, вычислить значения

$$60 \sum \frac{s}{t}.$$



Фиг. 99. $H=50$; $Q=460$.

Для нахождения же времени хода

$$T = 60 \sum \frac{s}{t} + \sum \tau, \dots \dots \dots 646$$

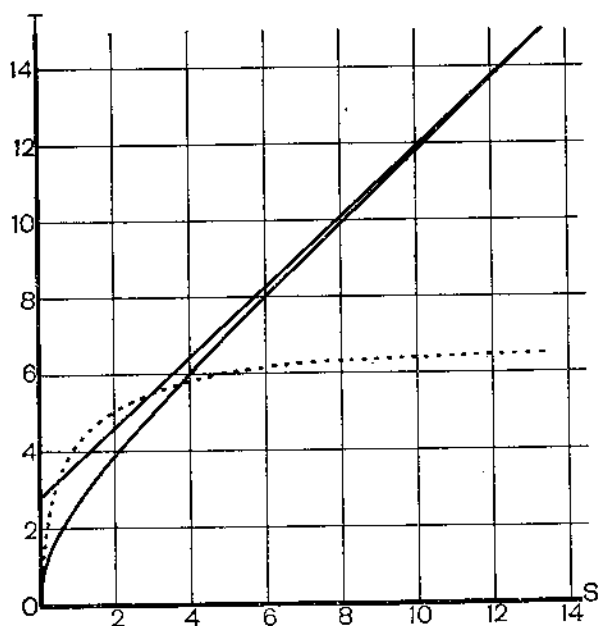
надо определить еще значения поправок τ , чем мы и займемся.

Хотя на спрямленном профиле участка Серпухов—Тула, приведенном на листе I приложения, некоторые станции и мосты, где ограничена скорость, показаны расположенными на подъемах и уклонах, фактически все они расположены на площадках, иногда только на столь коротких, что их не стоило, как мы увидим в § 70, вводить в расчетный профиль. А так как согласно указаний, сделанных на стр. 205, поправки τ надлежит вычислять исходя из равномерных скоростей движения, независимо от того, достигаются ли они фактически или нет, то вычисления всех τ в нашем примере можно вести по площадке. Всего нам надо определить восемь τ :

- 1) для разгона от 0 до равномерной скорости на площадке $V_0 = 65$;
- 2) для разгона от скорости $V = 50$, установленной для прохождения станций, до $V_0 = 65$;
- 3) для разгона до $V_0 = 65$ от скорости $V = 30$, установленной для моста через реку Упу;
- 4) для разгона до $V_0 = 65$ от $V = 40$, установленной для моста через р. Оку;

- 5) для замедления от V_0 до 0;
- 6) для замедления от V_0 до $V=50$;
- 7) для замедления от V_0 до $V=40$;
- 8) для замедления от V_0 до $V=30$.

Для нахождения первых четырех поправок строим кривые Γ и t для разгона на площадке, как показано на фиг. 100, которая дает:



Фиг. 100. H'' ; $Q = 460$.

$$\tau_1 = 2,8$$

$$\tau_2 = 0,8$$

$$\tau_3 = 1,4$$

$$\tau_4 = 1,0$$

что же касается поправок на замедление, то все они могут быть взяты из фиг. 95, согласно которой

$$\tau_5 = 0,7$$

$$\tau_6 = 0,1$$

$$\tau_7 = 0,1$$

$$\tau_8 = 0,2$$

При наличии всех этих поправок определение времен хода, как показано в таблице XXIII, не представляет никаких затруднений.

Таблица XXIII. Серпухов—Тула.

.....

Поезд: скорый дальнего хода

$P = 100t$

Паровоз серии: НУ

$Q = 460t$

Принято при расчете

$s = 50, V_{max} = 100$

$w'_0 = 1,3 + 0,02V + 0,0005V^2$

$w''_0 = 1,5 + 0,5V \frac{V+10}{1000}$

Станции	s	i _k	V	60/V	60s/V	Σt	τ	T	Прим.
Серпухов . . .	1032	-0,54	69	0,87	0,90	4,1	2,8	7,0	
	3440	-8,0	100	0,60	2,06				
	427	-11,3	100	0,60	0,26				
	990	-0,9	71	0,86	0,85				
							0,1		
Ока	1025	-0,90	71	0,825	0,85	13,2	1,0	14,3	V = 40!
	6510	+7,50	32	0,89	12,30				
							0,1		
Свинская . . .	362	-2,10	78	0,775	0,28	18,8	0,8	19,7	V = 50!
	8135	+7,80	31	1,92	15,60				
	2845	+1,17	59	1,03	2,93				
							0,1		
Тарусская . . .	1042	+0,16	65	0,93	0,97		0,8		V = 50!
	1250	-6,00	100	0,60	0,75				
	1937	+8,55	29	2,09	4,05				
	1730	-2,90	83	0,715	1,24				
	4275	+1,00	60	1,00	4,28				

Станция	s	z_k	V	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	Σt	τ	T	Прим.	
Пахомово . . .	1067	+7,30	32,5	1,85	1,98	17,9		18,8	$V=50!$	
	1812	+1,70	56	1,07	1,94					
	375	-4,00	90	0,67	0,25					
	1103	-7,00	10,0	0,60	0,66					
	500	-1,00	71,5	0,85	0,43					
	333	+8,00	31	1,98	0,66					
	542	+1,00	60	1,00	0,54					
							0,1			
	583	-5,50	100	0,60	0,32	6,4	0,8	7,3		$V=50!$
	1067	+6,00	37	1,63	1,74					
	1067	+1,10	59,5	1,02	1,10					
	1832	-7,90	100	0,60	1,10					
	1270	+1,65	56,5	1,07	1,36					
	604	+3,00	5,95	1,21	0,73					
						0,1				
Шульгино . . .	208	+3,00	49,5	1,21	0,25	14,8	0,8	16,3	$V=50!$	
	3335	-8,15	100	0,60	2,00					
	729	-1,00	71,5	0,85	0,62					
	854	+10,00	25	2,40	2,05					
	521	+7,00	33,5	1,80	0,94					
	2860	+8,00	31	1,98	5,67					
	937	-0,50	68	0,88	0,82					
	1500	-8,60	100	0,60	0,90					
	417	-5,65	100	0,60	0,25					
	854	+0,10	65	0,93	0,79					
	354	-5,00	96	0,62	0,22					
	313	0,00	65,5	0,92	0,29					
							0,7			

Полученное таким образом полное время хода от Серпухова до Тулы

$$T = 124,4'$$

на 13,6% больше определенного по способу Липеца $T = 109,5$. Такая несходимость не является случайностью; обыкновенный способ при пересеченном профиле обычно дает время хода больше, чем интегрирование уравнения движения поезда.

Пример 7. Определить время хода товарного поезда от Горовастыцы до Осташкова согласно заданиям, изложенным на стр. 195.

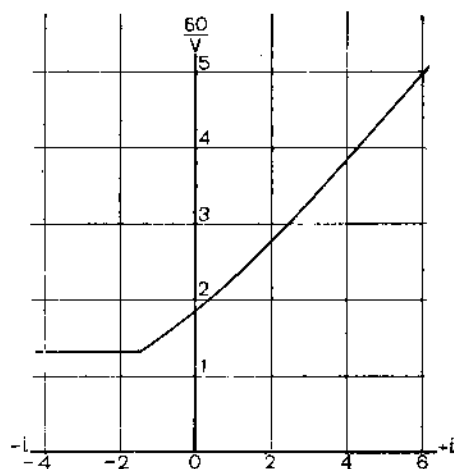
Пользуясь кривой

$$f_k - w_0 = f_0(V)$$

фигуры 86, строим кривую

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k),$$

изображенную на фиг. 101, и затем производим вычисления, как показано в таблице XXIV.



Фиг. 101. $БЧ$; $Q = 1000$; $\tau = 25$.

Таблица XXIV. Горовастыца — Осташково.

.....									
Поезд: товарный						$P = 100$			
Паровоз серии: БЧ						$Q = 1000$			
Принято при расчете:						$\tau = 25$			
						$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}$			
Станции	s	i_k	V	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	Σi	τ	T	Прим.
Горовастыца . .						2,5			
	534	0	32,4	1,85	0,96				
	641	-5,5	40	1,5	0,96				
	1680	-0,13	33	1,82	3,06				

Станции	s	ik	V	60 V	$\frac{60s}{V}$	Σt	τ	T'	Прим.	
Черный Дор . .	735	+5,15	13,4	4,48	3,27	41,13		46		
	427	-4,5	40	1,5	0,64					
	2725	+1,4	24,2	2,48	6,76					
	267	+6,0	12,2	4,96	1,33					
	2490	+1,45	24	2,50	6,24					
	1600	-0,48	35,7	1,68	2,69					
	480	-5,3	40	1,5	0,72					
	1920	0	32,4	1,85	3,55					
	427	-6,0	40	1,5	0,64					
	834	+0,75	27,6	2,17	1,81					
	2010	-4,7	40	1,5	3,02					
	427	0	32,4	1,85	0,78					
	641	+6,45	11,4	5,24	3,36					2,1
	727	0	32,4	1,85	1,34					
	1517	+0,34	30	2,00	3,04	50,5		55		
	310	+6,35	11,6	5,17	1,60					
	2760	+0,25	30,4	1,97	5,43					
	1067	-4,9	40	1,5	1,60					
	940	+3,71	16,3	3,68	3,46					
	652	-4,9	40	1,5	0,98					
	855	0	32,4	1,85	1,58					
	630	+4,6	14,3	4,18	2,63					
	3050	-4,0	40	1,5	4,17					
	620	+0,27	30,3	1,98	1,23					
	1820	+6,35	11,6	5,17	3,41					
	855	0	32,4	1,85	1,58					
	2470	-5,22	40	1,5	3,71					

Станции	s	i_k	V	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	Σt	τ	T	Прим.
	727	+5,03	13,6	4,41	3,20				
	620	-4,04	40	1,5	0,93				
	610	+5,15	13,4	4,48	2,73				
	525	0	32,4	1,85	0,97				
	267	-4,9	40	1,5	0,40				
	983	0	32,4	1,85	1,82				
Осташково . .							2,1		

Согласно этой таблице общее время хода

$$T' = 101',$$

что на 16 $\frac{1}{10}$ больше

$$T = 87',$$

определенного нами по способу Липеца. Выше впрочем было уже отмечено, что обыкновенный способ всегда дает время хода больше, чем способы, учитывающие инерцию поезда. Наиболее резко это обнаруживается на тех перегонах, где сравнительно крутые уклоны чередуются с такими же под'емами; на них, благодаря разгону, средние скорости получаются гораздо больше тех, которыми мы задаемся при обыкновенном способе, особенно же это заметно для тяжелых товарных поездов. Таким образом рассматриваемый нами пример и по составу и по профилю близок к тем условиям, которые дают наибольшее расхождение между обыкновенным и точными способами расчета времени хода. Тем не менее одна возможность подобных ошибок указывает уже на то, что гипотезы Липеца о природе поправок τ , изложенные на стр. 201, довольно далеки от действительности. Повидимому, отрицательные поправки на замедление больше соответственных поправок на разгон.

Пример 8. Определить, насколько увеличится коммерческая скорость товарных поездов весом 42000 пуд. при паровозе 0—4—0 О^в на участке Серпухов—Тула, если наибольшую скорость их по тормазам поднять с 35 вер./час до 45, при условии, что средняя величина простоев в обоих случаях равна $3\frac{1}{2}$ часам, а $\alpha = 30 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ (нефть).

Задача эта сводится к определению времени хода в обоих предположениях. Принимая для всего поезда

$$w_0 = 1,5 \div \frac{V}{20},$$

строим по данным «паспорта» для паровоза ОВ эшпору

$$f_k = w_0 + f_0(i_k),$$

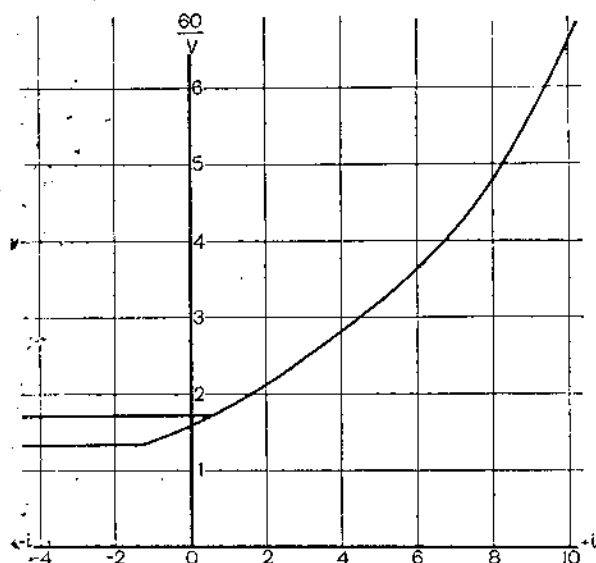
а по ней

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k),$$

изображенную на фиг. 101. Что же касается поправок τ , то согласно фигурам 93—94, для $Q = 42\,000$ пуд. на $i_k = 0$ при 3-х осном тендере

$$\tau_0 = 1,9'$$

$$\tau_n = 1,6'$$



Фиг. 102. ОВ; $z = 30$; $Q = 42\,000$ пуд.

мы же для осторожности примем, как это обычно делают,

$$\tau_0 + \tau_n = 4'.$$

Пользуясь всеми этими данными, при наличии тех же постоянных предупреждений, которые были указаны на стр. 190, получаем цифры, приведенные в таб. XXV.

Таблица XXV. Серпухов — Тула. О^в. Q = 42000 пуд.

[illegible]

Станция	s	z_k	$V_m = 35$					$V_m = 45$				
			$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	$\Sigma \frac{60s}{V}$	τ	T	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$	$\Sigma \frac{60s}{V}$	τ	T
Шульгино	583	-5,50	1,71	1,00				1,33	0,78			
	1067	+6,00	3,62	3,86				3,62	3,86			
	1067	+1,10	1,88	2,01	14	4	18	1,88	2,01	13	4	17
	1832	-7,90	1,71	3,13				1,33	2,44			
	1270	+1,65	2,04	2,59				2,04	2,59			
	604	+3,00	2,45	1,48				2,45	1,48			
Шульгино	208	+3,00	2,45	0,51				2,45	0,51			
	3335	-8,15	1,72	5,71				1,33	4,44			
	729	-1,00	1,71	1,24				1,39	1,02			
	854	+10,00	6,66	5,68				6,66	5,68			
	521	+7,00	4,13	2,16				4,13	2,16			
	2860	+8,00	4,80	13,71	36	4	40	4,80	13,71	34	4	38
	937	-0,50	1,71	1,60				1,5	1,39			
	1500	-8,60	1,71	2,57				1,33	2,00			
	417	-5,65	1,71	0,71				1,33	0,56			
	854	+0,10	1,71	1,46				1,63	1,39			
	354	-5,00	1,71	0,61				1,33	0,47			
	313	0,00	1,71	0,53				1,60	0,50			
Лаптево	417	+0,70	1,77	0,74				1,77	0,74			
	1067	-6,45	1,71	1,83				1,33	1,42			
	417	+0,35	1,71	0,71				1,69	0,71			
	1270	+9,32	6,00	7,62				6,00	7,62			
	1250	+7,3	4,33	5,42				4,33	5,42			
	1562	-8,90	5,64	8,82	45	4	49	5,64	8,82	43	4	47

Станции	s	i_k	$V_m = 35$					$V_m = 45$				
			60 V	60_s V	$\Sigma 60_s$ V	τ	T	60 V	60_s V	$\Sigma 60_s$ V	τ	T
Ревякино	958	-4,45	1,71	1,64				1,33	1,27			
	1040	+4,90	3,15	3,28				3,15	3,28			
	396	-5,00	1,71	0,68				1,33	0,53			
	1355	-8,50	1,71	2,32				1,33	1,80			
	1355	-7,45	1,71	2,32				1,33	1,80			
	1457	+8,20	5,00	7,29				5,00	7,29			
	1478	0,00	1,17	2,53				1,60	2,36			
	2270	0,00	1,71	3,90				1,60	3,63			
	2500	-6,35	1,71	4,30				1,33	3,33			
	1312	+0,65	1,76	2,31				1,76	2,31			
	1478	-7,50	1,71	2,53	17	4	21	1,33	1,97	15	4	19
	916	+6,00	3,33	3,05				3,33	3,05			
	458	+0,35	1,71	0,78				1,70	0,78			
Хомяково	292	+0,35	1,71	0,50				1,70	0,50			
	875	-6,40	1,71	1,50				1,33	1,16			
	625	+1,10	2,84	1,77	20	6	26	2,84	1,77	17	6	23
	8070	-7,73	1,71	13,80				1,33	10,73			
	1683	-0,55	1,71	2,88				1,49	2,51			
Тула												

Из нее мы видим, что при $V_m = 35$ полное время хода

$$T = 293' = 4,88 \text{ h,}$$

а при $V_m = 45$

$$T = 279' = 4,65 \text{ h,}$$

т. е. всего на 14' меньше; переходя же к полному времени на

хождения поезда на участке, в первом случае мы имеем

$$T_c = 4,88 + 3,50 = 8,38 \text{ h}$$

и среднюю коммерческую скорость

$$V_c = 11,1 \text{ вер./час,}$$

а во втором

$$T_c = 4,65 + 3,50 = 8,15 \text{ h}$$

и

$$V_c = 11,6.$$

Иными словами, увеличение предельной скорости с 35 до 45 вер. в час, требующее в данном случае семь лишних тормазильщиков, увеличивает коммерческую скорость всего на 4%.¹⁾

§ 66. Способ эквивалентных под'емов. Всматриваясь в кривые

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k),$$

приведенные на фигурах 99, 101 и 102, мы видим, что они имеют однообразное очертание. Возможность воспользоваться этим подобием в целях сокращения работы при расчетах давно уже привлекала разных исследователей. Так, Меерович¹⁾ предложил для кривых

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k),$$

эмпирическую формулу

$$\frac{1}{V} = AKi_k,$$

где K зависит только от паровоза, а A — от состава; Чечотт на основании этого подобия предлагал перспективный способ построения кривых

$$V = \psi(s)^2;$$

но наиболее практичное в этом направлении предложение сделал Липец.

Суть его предложения, которое можно назвать способом эквивалентных под'емов, состоит в том, что он считает возможным сумму

$$\sum \frac{1}{V},$$

¹⁾ Железнодорожное Дело, 1902, стр. 120.

²⁾ Чечотт. Новый метод , стр. 233.

входящую в формулу времени хода

$$T = \sum \frac{s}{V} + \sum \tau,$$

определять не путем довольно утомительных выкладок, которым посвящены стр. 212—222, а из указанного подобия кривых

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k),$$

Он называет эквивалентную скоростью перегона величину

$$V_e = \frac{\sum s}{\sum \frac{s}{V}}$$

а эквивалентным под'емом i_e под'ем, соответствующий этой скорости на диаграмме

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k).$$

На первый взгляд кажется, что величина i_e для данного перегона будет различна в зависимости от типа паровоза, форсировки котла и величины состава. Липец, однако, утверждает, что по его многочисленным подсчетам, для данного паровоза и z , т. е. для данной кривой силы тяги, i_e не зависит от состава. Более того, по его мнению, влияние на значения i_e типа паровоза и z настолько мало, что для многих случаев практики им можно пренебрегать.

А если это так, то, определив раз навсегда значения i_e для всех перегонов, мы можем для любого из них, и притом для любых условий, найти значение

$$\frac{1}{V_e} = \frac{\sum \frac{s}{V}}{\sum s}$$

из кривой

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k),$$

соответствующей этим условиям. Иными словами, при методе эквивалентных под'емов, вместо формулы

$$T = \sum \frac{s}{V} + \sum \tau \quad \dots \quad 64$$

мы пользуемся формулой

$$T' = \frac{\Sigma s}{V_e} + \Sigma \tau, \quad 66$$

беря V_e прямо из кривой

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k),$$

т. е. сводя весь перегон к одной строчке таблиц XX—XXI, XXIII—XXV.

Такая простота способа эквивалентных под'емов делает доступным пользование им весьма широкому кругу железнодорожных агентов. При нем от того учреждения, где на данной дороге сосредоточено производство тяговых расчетов, требуется только издание трех таблиц:

1. значение i_e для всех перегонов,
2. значений

$$\frac{60}{V_e} = \psi(i_r)$$

для разных паровозов, составов и z и

3. значений поправок τ .

Подсчет же по этим данным времени хода для разных частных случаев может производиться в конторе движения или даже в конторах отделений лицами без всякой технической подготовки. А это в эксплуатационном отношении представляет большие удобства.

Для того, однако, чтобы рекомендовать этот способ, недостаточно еще его простоты; нужно быть кроме того уверенным, что он дает более или менее надежные результаты. Очевидно, что степень его точности находится в прямой зависимости от того, насколько точно положенное в его основу допущение о постоянстве i_e для данного перегона. Изучением степени достоверности этого предположения мы и займемся.

Предположим, что на фиг. 103 мы имеем для двух различных условий зависимости

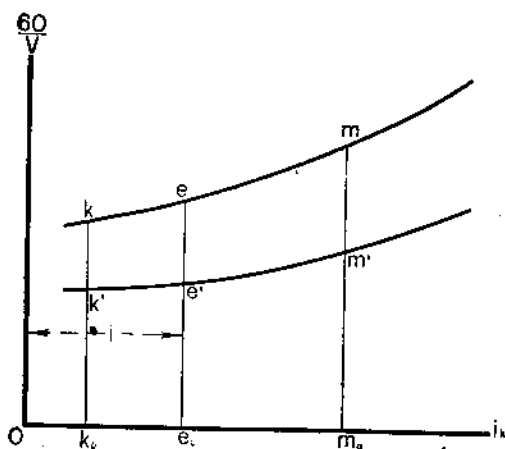
$$\frac{1}{V} = \psi(i_k)$$

$$\frac{1}{V'} = \psi'(i_k)$$

Пусть, далее, для первых условий отрезок Oa_0 изображает собой величину i_e для некоторого перегона. В этом случае, следова-

тельно, e_0 есть

$$\frac{1}{V_e} = \frac{\sum s}{\sum s} = \frac{1}{\sum s} (s_k k k_0 + s_m m m_0 + \dots)$$



Фиг. 103.

где s_k , s_m и т. д. представляют из себя длины соответственных участков. С другой стороны, если предположение Липца верно, и e_0 изображает собой эквивалентный под'ем данного перегона для всяких условий, то для условий, характеризующихся нижней кривой,

$$e_0 e' = \frac{1}{V_e} = \frac{1}{\sum s} (s_k k' k_0 + s_m m' m_0 + \dots)$$

отсюда следует, что

$$\frac{e_0 e}{e_0 e'} = \frac{s_k k k_0 + s_m m m_0 + \dots}{s_k (k' k_0 + s_m m' m_0 + \dots)}$$

А так как подобное соотношение, согласно предположения Липца, справедливо для всякого перегона, т. е. для любой комбинации i_k , то мы в праве утверждать, что практически оно сводится к условию

$$\frac{e_0 e}{e_0 e'} = \frac{k k_0}{k' k_0} = \frac{m m_0}{m' m_0} = \dots = \text{пост.}$$

Таким образом оказывается, что предположение о постоянстве i для данного перегона эквивалентно допущению, что отношение

между ординатами двух любых кривых

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k)$$

постоянно, или, что все эти кривые имеют уравнения вида

$$\frac{1}{V} = A \varphi(i_k),$$

где от типа паровоза, состава и форсировки котла зависит только A . Насколько, однако, такое допущение правдоподобно?

Рассмотрение большого числа кривых

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 67$$

приводит к заключению, что для одного и того же паровоза и состава, но для разных γ -эти кривые удовлетворяют условию 67 довольно хорошо; при переходе же к другому составу пропорциональность между их ординатами несколько нарушается. Что же касается кривых

$$\frac{1}{V} = \psi(i_k)$$

для разных паровозов, то между ними не только не наблюдается указанной пропорциональности, но нередко они даже пересекаются между собой. Такое явление, в корне опровергающее условие 67, наблюдается даже для сравнительно близких типов паровозов. Так, на фигуре 104 сопоставлены кривые

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k)$$

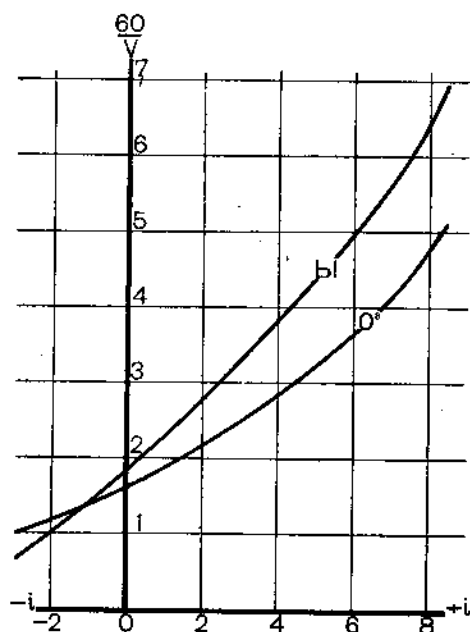
для паровозов 0-4-0 Ов¹ и Ы, приводившиеся на фиг. 101 и 102. Оба эти паровоза — двухцилиндровые компаунд, тем не менее приведенные кривые пересекаются друг с другом.

Таким образом мы видим, что предположение о характере кривых

$$\frac{1}{V} \doteq \psi(i_k),$$

положенное в основу способа эквивалентных под'ёмов, не вытекает из природы этих кривых и может считаться более или менее верным только для данного типа паровоза. При переходе же к другому типу паровоза эти кривые могут заметно изменить свое очертание. В виду этого можно предвидеть, что для того

типа паровоза, по которому определены i_e , способ эквивалентных подъемов может дать довольно точные результаты; при пере-



Фиг. 104.

ходе же к другому паровозу применение этого способа делается несколько рискованным.

Кроме того надо иметь в виду, что даже в том случае, когда мы оперируем с группой кривых, удовлетворяющих уравнению

$$\frac{1}{V} = A \psi(i_k), \dots \dots \dots 67$$

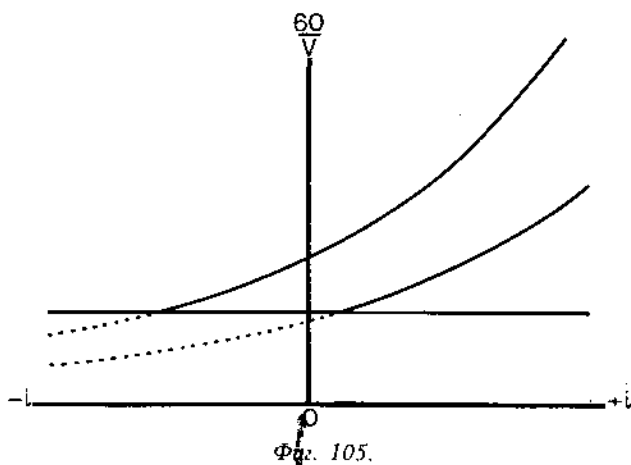
от способа эквивалентных подъемов далеко не всегда можно ждать точных результатов. Дело в том, что в действительности, как показывают фиг. 99, 101, 102 и 105, эти кривые обрываются горизонтальной прямой

$$\frac{1}{V_{max}}$$

и притом, для разных паровозов, составов и z , на различных подъемах. Поэтому для целого ряда их пропорциональность ординат кривых $1/V$ заведомо нарушается. Между тем Липец применяет способ эквивалентных подъемов и для таких перегонов,

в состав профиля которых входят под'емы, где скорость ограничена. Можно было бы, конечно, в этом случае расчет вести по пунктирной части кривых $1/V$ (фиг. 105) и затем вводить поправку

$$\tau_m = s_m \left(\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V} \right),$$



Фиг. 105.

но тогда нам пришлось бы экстраполировать кривые F далеко за пределы опыта, например, для нормального паровоза до $V = 100 - 120$, что, конечно, исключает какую-либо надежность таких подсчетов. Поэтому, представляется наиболее правильным для перегонов с большим протяжением элементов, где скорость ограничена, вовсе не пользоваться методом эквивалентных под'емов, а вести расчет обыкновенным способом.

Так или иначе, способ эквивалентных под'емов не может считаться способом точным. Что же касается степени его неточности, то она может быть установлена только из ряда примеров для самых разнообразных условий, к решению которых мы и переходим.

Пример 9. Найти эквивалентный под'ем перегона Поворова — Крюково.

Из сказанного ясно, что эквивалентный под'ем определяется, исходя из какого-либо определенного времени хода. Естественно поэтому возникает вопрос, каким же паровозом, составом и ε надо задаться для определения этого основного времени хода. Прежде всего надо отметить, что для лучшей сравнимости результатов желательно определение i_e вести по одному паровозу и составу; с другой же стороны, более точные расчеты желательно вести для наиболее часто встречающейся группы поездов.

Исходя из этих соображений, мы будем вести все расчеты i_e по нормальному паровозу при весе поезда в 42000 пуд., что составляет наибольший состав для под'ема в 8⁰/₁₀₀ при совпадении с кривой радиуса 300 саж., т. е. наибольший состав для русских магистральных условий. Что же касается z , то зададимся $z=30$, что в товарной службе является почти пределом. Второй вопрос, возникающий при определении i_e , это вопрос о предельных скоростях. В данном случае будем вести определение i_e , принимая во внимание ограничение скорости, как это предлагает Лилец. Что же касается самой величины V_m , то примем, как это установлено на Ник. ж. д., $V_m=45$ вер./час. ≈ 45 km/h. Зависимость

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k)$$

для паровоза О^в при $z=30$ и $Q=42000$ пуд. дана на фиг. 102 (стр. 218). Беря отсюда значения $60/V$, соответствующие профилю нашего перегона, и производя все вычисления, как показано в таб. XXVI, получаем

Таблица XXVI.

№ участка	s	i_k	$\frac{60}{V}$	$\frac{60s}{V}$
1	1105	+ 2,30	2,23	2,47
2	1876	— 1,56	1,33	2,49
3	3333	+ 4,25	2,89	9,64
4	6417	— 2,40	1,33	8,53
Σ	12731	—	—	23,13

$$\Sigma \frac{s}{V} = 23,13$$

$$\frac{60}{V_p} = 1,82.$$

что на диаграмме фигуры 102 соответствует

$$i_e = +0,9.$$

Пример 10. Определить эквивалентные под'емы перегонов участка Серпухов—Тула.

Произведем этот расчет при $V_m = 35$ и $V_m = 45$, для чего воспользуемся данными таблицы XXV. Вычисление помощью их по кривой фигуры 102 величин i_e , как это показано в таблице XXVII, не представляет никаких затруднений. В этой же таблице приведены значения для каждого перегона величины

$$\sigma_m = \frac{\sum s_m}{\sum s},$$

Таблица XXVII. 0—4—0 0^B Q=42 000 пуд.

Станции	$\sum s [m]$	σ_m	$V_m = 35$			$V_m = 45$		
			$\sum \frac{60s}{V}$	$\frac{60}{V_e}$	i_e	$\sum \frac{60s}{V}$	$\frac{60}{V_e}$	i_e
Серпухов	—	—	—	—	—	—	—	—
Ока	5 889	0,66	10	1,70	+0,6	8	1,46	—0,7
Свинская	7 735	0,0	30	5,23	+7,2	30	5,23	+7,2
Турусская	11 342	0,0	44	3,88	+6,4	44	3,88	+6,4
Пахомово	15 966	0,09	39	2,44	+2,8	37	2,32	+2,6
Шульгино	6 423	0,22	14	2,15	+2,2	17	2,76	+1,8
Лаптево	12 882	0,44	36	2,80	+4,0	34	2,65	+3,5
Ревякино	14 020	0,37	45	3,22	+5,1	43	3,05	+4,6
Хомяково	8 934	0,45	17	1,89	+1,4	15	1,68	+0,7
Тула	11 545	0,71	20	1,72	+0,6	17	1,47	—0,7

где s_m длина тех элементов профиля, на которых, судя по обыкновенному способу, скорость ограничена условием

$$V \leq V_m.$$

Пример 5. Определить время хода дачного поезда по перегону Поворово—Крюково согласно заданий, изложенных на стр. 168.

На предыдущей странице для этого перегона мы нашли $i_e = +0,9$. Такому под'ему по диаграмме фиг. 96 (стр. 206) при $z = 47$ соответствует

$$\frac{60}{V_e} = 0,74,$$

откуда при $\Sigma s = 12731$ м

$$\Sigma \frac{60s}{V} = \frac{60 \Sigma s}{V_e} = 9,43'.$$

Что же касается поправок, то на стр. 207—208 мы нашли, что они для этого перегона равны 4,1'. Поэтому

$$T = \frac{60 \Sigma s}{V_e} + \Sigma \tau = 13,5',$$

что очень хорошо согласуется как с результатами определения T точными способами, давшими в среднем 13,2', так с непосредственными результатами поездок, давшими в среднем тоже 13,5. Особенно же интересен тот факт, что

$$60 \Sigma \frac{s}{V},$$

определенная обыкновенным способом и способом эквивалентных под'емов, отличаются между собой всего на 0,3' или на 4%, в то время как величина i_e была определена в условиях, совершенно не сходных с нашим примером: с одной стороны, мы имеем дачный поезд, ведомый мощным быстроходным паровозом не компаунд с перегретым паром, а с другой, товарный поезд при нормальном паровозе компаунд. Такое совпадение действительно пробуждает веру в возможность широкого применения способа эквивалентных под'емов, не считаясь с типами паровозов, хотя, конечно, сделать такое заключение на основании только одного примера нельзя. Тем более поэтому интересны следующие примеры.

Пример 6. Определить времена хода скорого поезда на участке Серпухов—Тула согласно заданий, изложенных на стр. 190.

Эквивалентные под'емы для этого участка в двух предположениях подсчитаны в таблице XXVII (стр. 230); кривая

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k)$$

приведена на фиг. 98 (стр. 209), а поправки τ на стр. 211. Пользуясь всеми этими данными, не трудно подсчитать времена хода, как это и исполнено в таблице XXVIII. В ней кроме того при-

Таблица XXVIII. №. Серпухов Тула.

Станции	Время хода		$\Sigma \tau$	Σs	σ_m	$V_m = 35$			$V_m = 45$		
	По способу Липеца $z = 50$	По обыкновенному способу				i_e	$\frac{60}{V_e}$	T	i_e	$\frac{60}{V_e}$	T
Серпухов .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ока . . .	6	7	2,8	5889	0,66	+ 0,6	0,98	9	— 0,7	0,84	8
Свинская .	12	14	1,1	7735	0	+ 7,2	1,83	15	+ 7,2	1,83	15
Турусская .	19	20	0,9	11342	0	+ 6,4	1,70	20	+ 6,4	1,70	20
Пахомово .	16	19	0,9	15966	0,09	+ 2,8	1,18	20	+ 2,6	1,15	19
Шудьгино .	7	7	0,9	6423	0,22	+ 2,2	1,11	8	+ 1,8	1,08	8
Лаптево .	14	16	1,5	12882	0,44	+ 4,0	1,34	19	+ 3,5	1,27	18
Ревякино .	17	21	2,9	14020	0,37	+ 5,1	1,56	24	+ 4,6	1,42	23
Хомяково .	8	9	0,9	8934	0,45	+ 1,4	1,03	10	— 0,7	0,99	10
Тула . . .	10	11	3,1	11545	0,71	+ 0,6	0,98	41	— 0,7	0,84	13
Итого . .	109	124	94736	—	—	—	—	139	—	—	134

ведены значения T , полученные по способу Липеца при $z = 50$ и по обыкновенному. Сравнивая эти T с теми, которые мы получили по способу эквивалентных под'емов, мы видим, что для всех перегонов эти последние больше первых, причем, что можно было впрочем и предвидеть, эта разница больше для i_e , определенных при $V_m = 35$. В общем, время хода, определенное по этим последним под'емам, на 12% больше, чем мы имели при обыкновенном способе, и на 17% — чем при способе Липеца. Если же воспользоваться i_e , определенными при $V_m = 45$, то эти цифры уменьшатся до 8 и 13%. Если же, как это было предложено на стр. 228, исключить из расчета по методу эквивалентных под'емов те перегоны, на которых много уклонов, например, для которых

$$\sigma_m > \frac{1}{3},$$

то мы получим, при расчете других перегонов по i_e , вычисленным

для $V_m = 35$,

$$T' = 127',$$

а при расчете по i_e , вычисленным для $V_m = 45$,

$$T' = 126',$$

что уже отличается от результатов, полученных обыкновенным способом всего на $1\frac{1}{2}-2\frac{0}{10}$.

Таким образом с этой поправкой способ эквивалентных под'емов обладает вообще почти той же точностью, как и обыкновенный, хотя и в этом случае он все-таки несколько увеличивает тот запас времени, который дает нам предположение Липеца о компенсации τ , положенное в основу обыкновенного способа. Если же применять способ эквивалентных под'емов без всяких поправок и для перегонов с большим протяжением уклонов, то запас времени может оказаться слишком большим. Это, конечно, безопасно, но едва ли экономно в смысле утилизации паровозов.

Пример 7. Определить время хода товарного поезда весом 61000 пуд. при паровозе 0—4—0 БЧ на участке Гороваста—Осташков, согласно заданиям, установленным на стр. 195.

Подсчитаем для этого случая значения i_e по той же самой предельной скорости

$$V_m = 40,$$

которая установлена этими заданиями. В этом случае, если принять к тому же во внимание незначительную разницу в z (25 и 30), мы в праве будем сказать, что вся невязка между значениями T' , полученными обыкновенным способом и способом эквивалентных под'емов, обуславливается тем, что результаты определения i_e по одному паровозу перенесены на другой. Оба они товарные, типа 0—4—0, но зато у БЧ зависимость

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

наиболее удаляется от того, что мы имеем у нормального паровоза. Именно у нормального паровоза, как это видно из фигур 9 и 10 (стр. 26 и 29), при больших скоростях F_k резко падает с увеличением скорости почти по закону прямой; напротив, в паровозе БЧ, в этой части кривые F_k загибаются кверху и становятся почти параллельными оси V .

Определяя i_e по нормальному паровозу при $z = 30$, $Q = 42000$ пуд., $V_m = 40$, мы нашли их значения, приведенные в таб. XXIX.

Там же приведены и расчеты T , из которых следует, что в данном случае способ эквивалентных подъемов дает время хода на 9⁰/₁₀ большее, чем обыкновенный.

Таблица XXIX. 0—4—0 Б^а Q = 1000.

Станции	Время хода		Σs	i_s	$\frac{60 \Sigma s}{V_e}$	τ	T
	по Липецу	обыкновенным способ.					
Горовастица . . .	—	—	—	—	—	—	—
Черный Дор . . .	40	46	18 561	+ 1,2	44,1	4,6	49
Осташков . . .	47	55	21 209	+ 1,6	56,0	4,6	61
Итого . . .	87	101	39 770	—	—	—	110

§ 67. Сравнения указанных выше способов. При оценке всякого способа расчета необходимо принимать во внимание не только степень точности получаемых результатов, но ту затрату труда, которой покупается эта точность. Сообразно этому в таблицах XXX—XXXII, где сведены результаты расчетов времен хода для наших трех примеров, указано также и то количество часов, которое потребовалось для производства этих расчетов. На основании этих таблиц, а также тех замечаний, которые мы делали в предыдущих параграфах этой главы при рассмотрении результатов наших расчетов, мы приходим к следующим выводам:

Таблица XXX. Перегон Поворова — Крюково. К^у. Q = 425.

Способ расчета	Аналитический	Деду	Липец	Обыкновенный	Эквивалентных подъемов	Средн. из опытных поездок
Время хода в минутах . . .	13,1	13,2	13,3	13,1	13,5	13,5
Разница против результатов поездок в минутах . . .	-0,4	-0,3	-0,2	-0,4	0	—
То же в % . . .	-5,4	-4,0	-2,7	-5,4	0	—
Затрата труда в часах . . .	37,0	18	1,3	0,5	0,2	—

Таблица XXXI. Участок Серпухов — Тула. Н°. Q = 460.

Способ расчета	Липеца	Обыкновенный	Эквивалентных под'смов			Опытная поездка
			$V_m=35$	$V_m=45$	$sm < 1/3$	
Время хода в минутах	109	124	139	134	127	112
Разница против результата поездки в минутах	- 8	+ 12	+ 27	+ 27	+ 15	—
Тоже в %	- 8	+ 11	+ 25	+ 20	+ 13	—
Затрата труда в часах	6,5	2,6	1,0	1,0	1,5	—

Таблица XXXII. Участок Гороватица — Осташков. Б°. Q = 1000.

Способ расчета	Липеца	Обыкновенный	Эквивалентных под'смов	Средн. из опытных поездок
Время хода в минутах	87	101	110	88
Разница против результатов поездок в мин.	- 1	+ 13	+ 22	—
Тоже в %	- 1	+ 15	+ 25	—
Затрата труда в часах	4	1,2	0,3	—

Прежде всего, сравнивая описанные методы расчета времени хода по их существу, мы можем их разделить на две резко отличающихся друг от друга группы. Расчеты первой группы (аналитический, Дедуи, Липеца, Дубелира, Чечотта, Фрея) дают не только время хода, но характер изменения скорости движения поезда на перегоне; расчеты же второй — только время хода. Расчеты первой группы представляют из себя лишь различные приемы интегрирования уравнения движения поезда и по существу своему свободны от каких-либо произвольных допущений о соотношениях, существующих между результатами этого интегрирования; расчеты же второй группы основаны на таких допущениях. Точность расчетов первой группы, если конечно не считать с точностью выбранных нами значений F и W , зависит

исключительно от точности вычислений или построений и может быть доведена до любой наперед заданной степени; точность результатов расчетов второй группы зависит от степени точности тех допущений, на которых они основаны; и так как эта последняя не может быть учтена теоретически, то сказать наперед, какова будет степень точности этих расчетов, нельзя; ее можно определить только сравнительным путем. Все это позволяет называть способы расчетов первой группы *точными*, а второй *приближенными*.

Как было уже указано, по существу все способы первой группы в смысле точности можно считать равноценными. Практически, однако, аналитический способ следует признать менее точным, чем способ Липеца, Дедуи и других, ибо, во-первых, при вычислениях легче сделать ошибку, чем при построениях, а во-вторых, аналитический способ требует замены опытной кривой

$$f_k - w_0' = f_0(V)$$

в довольно широких пределах линейными или параболическими формулами, что всегда вносит некоторую погрешность, и, наконец, в-третьих, способ последовательных приближений, которым приходится все время пользоваться, тоже дает известный % неточности. С другой стороны, аналитическое интегрирование уравнения движения поезда требует времени в 20 раз больше, чем графическое. Все это вместе взятое заставляет меня категорически предостеречь читателей от применения аналитического интегрирования к расчету времен хода: ничего кроме потери времени оно дать не может.

Переходим теперь к сравнению чисто графических приемов. Из числа их на стр. 139 мы отдали решительное преимущество способам Дедуи и Липеца, как наиболее наглядным и простым. Точность их и по существу и на основании таб. XXX следует признать почти одинаковой, но нельзя не признать, что способ Липеца, дающий изменения скорости непосредственно в функции профиля, удобнее способа Дедуи, за которым таким образом остается лишь историческое значение.

Переходя теперь к сравнению между собой приближенных способов, отметим прежде всего, что теоретически степень их точности далеко не одинакова: в основу обыкновенного способа положено лишь предположение о компенсации поправок τ (стр. 201), а в основу способа эквивалентных под'емов кроме того еще и предположения о природе кривых

$$f_k - w_0 = f_0(V).$$

а непосредственно из опыта или из расчетов, произведенных точным образом, при чем эти поправки могут быть и отрицательные, то расходимость обыкновенного и точных способов не превысит 5—6%. В тех случаях, где такая точность по условиям эксплуатации достаточна, применение приближенных способов с указанной оговоркой вполне допустимо. Что же касается выбора между ними, то по соображениям, изложенным на стр. 224, симпатии автора всецело на стороне метода эквивалентных под'емов, особенно если при определении i_e для участков «перевалистого» профиля время хода определять одним из точных способов.

Что же касается тех сравнительно редких случаев, когда для нужд эксплуатации время хода нужно определить с точностью до $\frac{1}{2}$ минуты, или когда почему-либо необходимо знать не только время хода, но и закон колебания скорости на перегоне, а также для определения поправок τ , то тогда приходится прибегать к способу Липеца.

§ 68. Сравнение расчетов времени хода по отсечкам и по z . В §§ 14—15 (стр. 42—47) было уже отмечено, что машинисты не держат и не могут держать z постоянным. Во-первых, на паровозе нет такого прибора, который бы показывал значения z в данный момент, а во-вторых, беспрестанные изменения ρ и ϵ отвлекали бы внимание машиниста от пути и сигналов. Таким образом фактически поезда возятся не по z , а по отсечкам, или точнее по комбинациям ρ и ϵ . Искусство машиниста в том и состоит, чтобы подбирать в пределах заданных ему времен хода и предельных скоростей такие комбинации, которые давали бы наименьший расход топлива. Поэтому расчеты по отсечкам, учитывающие это искусство, ближе подходят к действительности, чем расчеты по z , по существу своему носящие несколько условный характер. Сказанное прекрасно иллюстрируется диаграммой листа I, приложенного в конце книги, где приведены расчетные и фактические кривые скоростей для нашего 6-го примера, т. е. для скорого поезда на участке Серпухов—Тула: кривая

$$V = \psi(s).$$

расчитанная по комбинациям, почти сливается там с точками, полученными во время опытной поездки, тогда как кривая, рассчитанная по z , довольно часто уклоняется от того, что имело место на самом деле.

Поэтому казалось бы, что раз по условиям эксплуатации от расчета требуется степень точности, исключающая возможность пользоваться приближенными приемами, т. е. раз мы долж-

ны прибегать к способу Липеца, то расчет необходимо вести по комбинациям. С другой стороны, однако, надо иметь в виду, что отличное совпадение расчетных и исполненных кривых в 5 и 6 примерах обуславливается тем, что при выполнении опытных поездок на перегоне Поворово—Крюково (пример 5) машинист должен был строго выполнять ту программу управления паровозом, которая была положена в основу расчета, а в примере 6-м мы расчет произвели по тем комбинациям, которые фактически были осуществлены во время поездок. В обычных же условиях, когда расчет выполняется ранее фактического его осуществления и машинисты никакой программы управления паровозом не получают, такого совпадения может и не быть. Более того, возникает вопрос, может ли оно быть. Конечно, предвидеть, как будет управлять паровозом машинист нетрезвый, неразвитой, необученный, не знающий профиля или просто недостаточно ознакомленный с особенностями данного типа паровоза,—невозможно. Но если машинисты достаточно обучены и ознакомлены с указаниями опытов, какие комбинации для данного типа паровоза дают наименьшие расходы топлива, то предвидеть его программу езды вполне возможно. Для этого нужно только считаться со всеми местными обстоятельствами, влияющими на действия машиниста, как-то: с плохой видимостью некоторых сигналов, боковыми толчками на некоторых кривых и т. п., как это мы и делали при расчете времени хода на перегоне Поворово—Крюково, по отношению к подходу к этой последней станции (стр. 170—171).

Таким образом от расчета времени хода по отсечкам можно ожидать полного совпадения с действительностью, только при условии, что лицо, ведущее расчет, хорошо знакомо со всеми особенностями того участка, для которого ведется расчет и с психологией машинистов вообще, и что эти последние будут фактически пользоваться хотя бы приблизительно той самой программой управления паровозом, которая положена в основание расчета. Если же эти два требования не могут быть соблюдены, ведение расчета по отсечкам бесцельно и даже вредно, ибо, с одной стороны, оно подрывает доверие к расчетам вообще, а во-вторых, требует раза в $1\frac{1}{2}$ больше времени, чем расчеты по z .

Но имеет ли смысл применять точные приемы к расчетам по z , и не проще ли, раз ведение расчета по комбинациям невозможно, переходить к обыкновенному способу или к способу эквивалентных под'емов? Действительно, и точные расчеты по z и приближенные заключают в себе известный элемент условности. Однако, условность эта разного порядка. При точных

расчетах по z мы лишь заменяем ступенчатую зависимость между силой тяги и скоростью (фиг. 19, стр. 45) непрерывной, зная, что такая замена введет в результаты наших расчетов известный запас времени. При обыкновенном же способе мы сверх этой замены делаем некоторые довольно произвольные допущения о природе поправок τ . Наконец, при способе эквивалентных под'емов мы делаем, кроме того, допущения о природе зависимости

$$f - w_0 = f_0(V),$$

гораздо более смелые, чем допущение о непрерывности этой функции, положенной в основу расчета по z .

Таким образом как в смысле точности, так и в смысле затраты времени рассматриваемые нами способы надо расположить в таком порядке:

- 1) Липца по комбинациям,
- 2) Липца по z ,
- 3) обыкновенный,
- 4) эквивалентных под'емов,

и исключить из числа рекомендуемых способов второй из них едва ли есть достаточные основания. Напротив, есть случаи, когда он имеет преимущество перед всеми остальными. Сюда прежде всего надо отнести определение поправок для 3 и 4-го способов: вести их по отсечкам, раз в основу этих способов положена гипотеза о непрерывности зависимости

$$F' = \varphi_k(z, V),$$

было бы неправильно. Затем построение Липца по z может быть рекомендовано, когда для такого построения по отсечкам нет данных, а время хода без кривой

$$V = \psi(s)$$

недостаточно еще для решения поставленной задачи, как это мы имеем, например, при выяснении влияния предельной скорости движения на время хода. Наконец, к этому способу можно прибегать и для точных расчетов на дорогах чрезвычайно однообразного профиля, когда ни о каких займах у котла и думать нельзя, как например, на участке Долинская—Николаев Южн. ж. д. или Арысь—Казалинск Ташк. ж. д. Для главной же линии Николаевской ж. д., где под'емы и уклоны в 2—3 тысячных чередуются довольно часто между собой, кривые

$$V = \psi(s),$$

построенные по z и по комбинациям, уже несколько расходятся между собой.

§ 69. Влияние конечной длины поезда. Полного совпадения расчетных кривых

$$V = \psi(s)$$

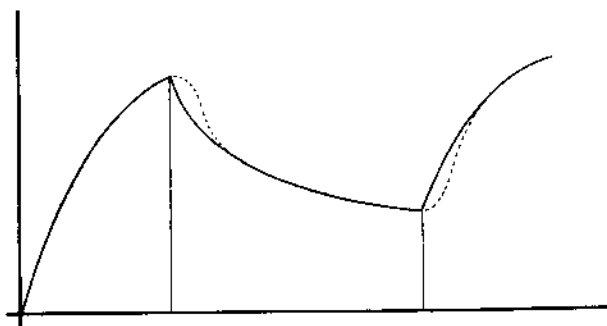
и полученных из опыта не наблюдается впрочем и при самых тщательных расчетах по отсечкам. Именно, как показывают диаграммы, приложенные в конце книги, фактические кривые

$$V = \psi(s)$$

никогда не имеют переломов в местах изменения профиля или комбинации, столь характерных для расчетных кривых. Иными словами, фактически зависимость

$$V = \psi(s)$$

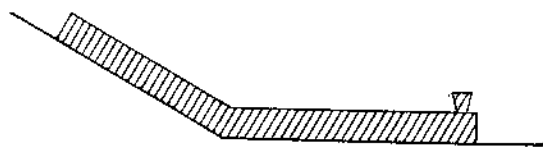
получается всегда в виде плавной кривой, как на фиг. 106



Фиг. 106.

показано пунктиром, в то время как при расчете она получается в виде ломаной кривой, как показано на той же фигуре сплошными линиями. Происходит это оттого, что при всех расчетах мы до сих пор предполагали, что масса поезда сосредоточена в одной точке. В самом деле, только при этом предположении можно считать, что переход с участка одного профиля на другой совершается мгновенно; в действительности же переход этот совершается постепенно, как это ясно из фиг. 107. Выяснению того, как велика ошибка от такого допущения, и посвящен настоящий параграф.

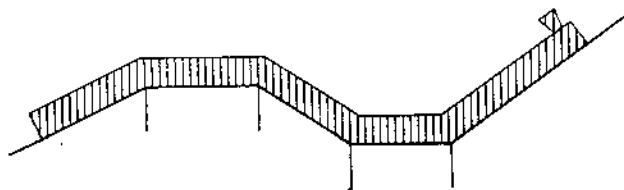
Раньше, однако, чем перейти к этому вопросу по существу, отметим, что он тесно связан с вопросом, насколько грубо можно спрямлять профиль для расчета времен хода. Очевидно, чем меньше те участки, в пределах коих мы считаем профиль однородным, тем больше нужно затратить времени и труда на расчет времени хода при всяком способе такого расчета. С другой



Фиг. 107.

стороны, как будто, чем эти участки будут ближе к действительности, тем точнее будет наш расчет. Позволительно думать, однако, что это верно только до некоторого предела, ибо если мы раздробим расчетный перегон на столь мелкие участки, что наш поезд будет находиться одновременно на нескольких из них (фиг. 108), то едва ли такой дробностью, особенно при игнорировании длины поезда самой по себе, мы увеличим точность расчета—скорее наоборот.

Выяснению этого последнего вопроса будет посвящен следующий параграф. Сейчас же для нас важно только отметить связь между вопросами о спрямлении профиля и о конечной



Фиг. 108.

длине поезда. Переходя к этому последнему, рассмотрим прежде всего, каким образом длина поезда L может быть введена в уравнение его движения.

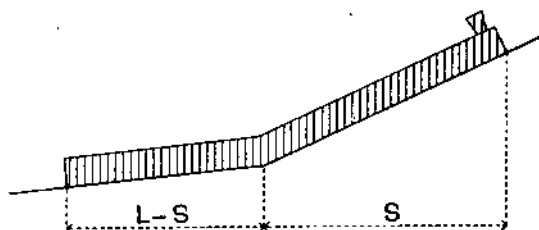
Чтобы не усложнять слишком наши формулы, предположим, что масса поезда распределена равномерно по длине его, и что

все части его имеют одинаковое удельное сопротивление. В этом случае, принимая за начало координат точку перелома профиля, мы можем для случая

$$0 < s < L$$

написать уравнение движения поезда под видом

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \zeta \left(f - w_1 \frac{L-s}{L} - w_2 \frac{s}{L} \right),$$



Фиг. 109.

где w_1 сопротивление на первом под'еме, а w_2 на втором. Это уравнение можно переписать под видом

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \zeta \left[f - w_1 + \frac{s}{L} (w_1 - w_2) \right];$$

или, замечая, что

$$w_1 = w_0 + i_1$$

и

$$w_2 = w_0 + i_2,$$

$$w_1 - w_2 = i_1 - i_2,$$

откуда

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \zeta \left(f - w_1 - \frac{i_1 - i_2}{L} s \right); \quad \dots \quad 68$$

отмечая далее, что

$$\zeta(f - w_1) = f \left(\frac{ds}{dt} \right),$$

и называя

$$\zeta \frac{i_1 - i_2}{L} = K,$$

мы получим окончательно уравнение движения поезда при переходе с одного под'ема на другой под видом

$$\frac{d^2s}{dt^2} = f\left(\frac{ds}{dt}\right) - Ks.$$

Это есть уравнение Риккати, которое интегрируется, как известно, лишь в исключительных случаях.

Таким образом оказывается, что разрешение поставленной нами задачи в общем виде невозможно. Приближенно же она может быть решена с любой наперед заданной точностью, даже учитывая разницу в сопротивлении паровоза и вагонов. В самом деле, назовем длину паровоза вместе с тендером через L' , а вагонов через L'' и разделим эту последнюю длину на m равных частей. Пока паровоз не вошел еще на второй под'ем, сопротивление всего поезда равно

$$W_1 = P(w'_0 + i_1) + Q(w''_0 + i_1);$$

когда же паровоз и тендер окажутся на под'еме, сопротивление поезда будет равно

$$W'_1 = P(w'_0 + i_2) + Q(w''_0 + i_1),$$

что эквивалентно вступлению всего поезда на под'ем i'_1 , определяемый из уравнения

$$W'_1 = Pw'_0 + Qw''_0 + (P + Q) i'_1,$$

откуда

$$i'_1 = \frac{Pi_2 + Qi_1}{P + Q}.$$

Затем, когда на под'ем войдет $\frac{1}{m}$ часть вагонов, сопротивление поезда делается равным

$$W' = P(w'_0 + i_2) + Q\left(w''_0 + \frac{m-1}{m} i_1 + \frac{1}{m} i_2\right),$$

а соответственный под'ем

$$i' = \frac{Pi_2 + Q\left(\frac{m-1}{m} i_1 + \frac{1}{m} i_2\right)}{P + Q}.$$

В общем же случае, когда на под'еме i_2 находится $\frac{x}{m}$ частей

длины вагонов

$$i^{(x)} = \frac{Pi_2 + Q\left(\frac{m-x}{m} i_1 + \frac{x}{m} i_2\right)}{P+Q}$$

Поэтому мы вправе сказать, что влияние конечной длины поезда эквивалентно постепенному изменению под'ема в пределах длины поезда. Это обстоятельство и позволяет нам дать приближенное решение нашей задачи.

В самом деле, принимая для s от 0 до L' удельное сопротивление поезда равным

$$w_0 + \frac{i_1 + i_1''}{2},$$

для s от L' до $L' + \frac{L''}{m}$

$$w_0 + \frac{i' + i'}{2},$$

для s от $L + \frac{L''}{m}$ до $L + 2 \frac{L''}{m}$

$$w_0 + \frac{i' + i''}{2}$$

и т. д., и интегрируя в этих пределах любым способом уравнение

$$\frac{dV}{dt} = \xi_1 (f - w)$$

мы можем получить кривую

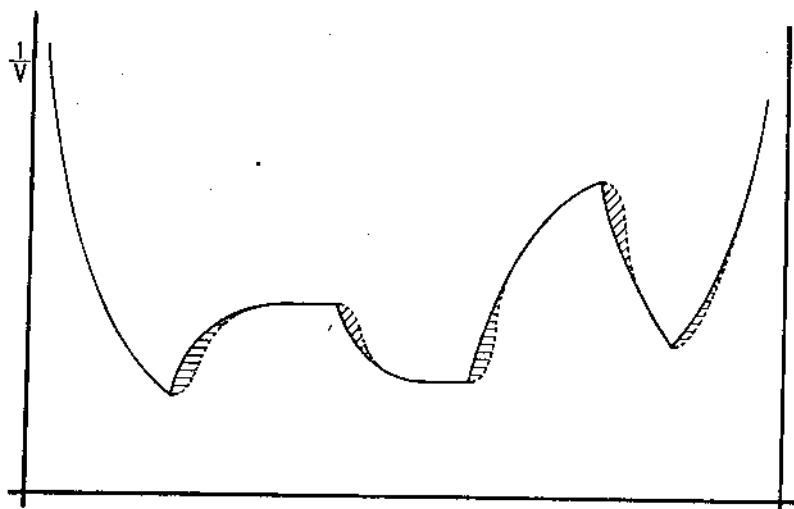
$$V = \psi(s)$$

для поезда данной длины, при чем, очевидно, эта кривая тем ближе будет подходить к действительности, чем больше мы возьмем m .

Итак, влияние конечной длины поезда может быть учтено; но теперь возникает вопрос, стоит ли производить такой учет при решении задач выдвигаемых практикой и прежде всего при определении поперегонных времен хода. На этот вопрос можно ответить только отрицательно. В самом деле, на времени хода конечная длина поезда может отразиться лишь настолько, насколько на площади Дубелировской кривой

$$\frac{1}{V} = \Psi(s)$$

отражаются те пунктирные поправки, которые отмечены на фиг. 110. Всматриваясь в исправленную таким образом Дубелировскую кривую, мы видим, что при каждом уменьшении скорости у



Фиг. 110.

нас получается некоторый выигрыш времени, отмеченный горизонтальной штриховкой, а при каждом увеличении скорости некоторая потеря, отмеченная косой штриховкой. Поправки эти настолько мало влияют на общую величину площади

$$\int_0^s \frac{1}{V} ds = t,$$

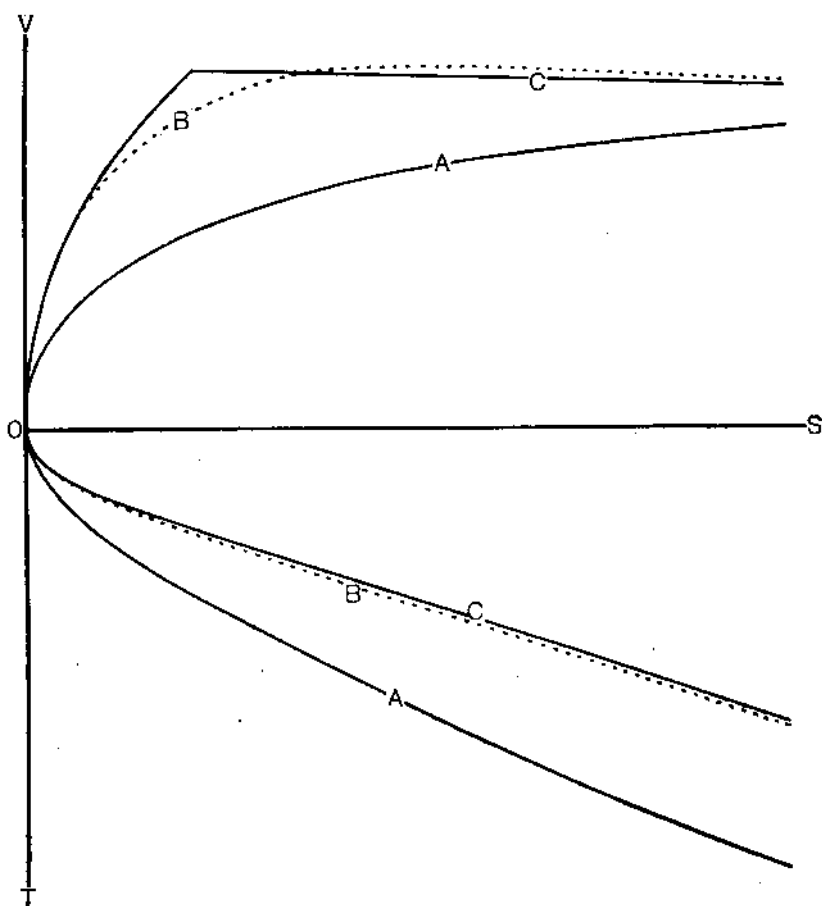
что ими вообще можно пренебречь; принимая же во внимание что они направлены притом в разные стороны, это можно делать и без всякого риска. Это лучше всего подтверждается тем, что результаты наших точных расчетов (примеры 5—7) и без подобных поправок дали более чем достаточную сходимость с результатами опытных поездок.

Некоторым исключением из сказанного сейчас правила являются случаи расчета поездов на крутых под'емах, следующих сразу за станционными площадками, где на первый взгляд нельзя не считаться с конечной длиной поезда, которая, в этом случае резко изменяет кривую скоростей. Чтобы проверить это, разберем конкретный случай расчета товарного поезда весом 43 000 пуд. на под'еме 6 $\frac{0}{100}$, следующем сразу

за станционной площадкой, в самом конце которой, у начала под'ема, остановился паровоз. Пусть это будет паровоз серии O^h , силу тяги для которого при $\varrho=1$, $\varepsilon=0,6$ берем из «паспорта» (см. фиг. 5 на стр. 23); сопротивление же всего поезда на площадке примем равным

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}.$$

Применяя к этим условиям способ Липеца—Лебедева, получаем для разгона на 6‰ под'еме кривые скоростей и времен, отмеченные на фиг. 105 буквой А. Если же длину вагонов разбить на 10 частей и построить эти кривые, как было



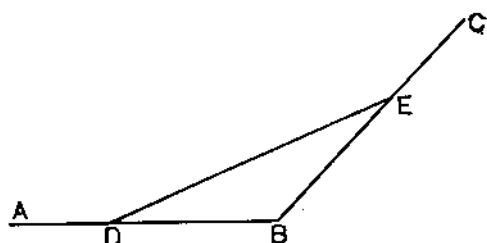
Фиг. 111.

указано на стр. 245, то они примут очертание, указанное на фиг. 111 буквой В. Разница получается очень заметная. Но еще

вопрос, обусловливается ли эта разница влиянием конечной длины поезда или тем, что мы молчаливо приняли массу поезда сосредоточенной в его голове. Для того, чтобы ответить на этот последний вопрос, построим кривую разгона нашего поезда, не учитывая непосредственно длины его, но принимая его массу сосредоточенной в середине его, т. е. предполагая, что она до вступления на под'ем пройдет путь $\frac{1}{2}L$ по площадке. Результаты такого расчета приведены на фиг. 111 в виде кривых **С**, почти совпадающих с кривыми **В**.

Таким образом мы видим, что принимая массу поезда сосредоточенной в середине поезда, во всех случаях, выдвигаемых практикой, можно не считаться с конечной длиной его. Несходимость же кривых **А** и **В** по существу объясняется тем, что при построении первых из них мы пренебрегли влиянием площадки, по которой сосредоточенная масса до вступления на под'ем успевает сделать пробег равный половине длины поезда. Иными словами, в данном случае суть дела заключается не в конечной длине поезда, а в том или ином пользовании профилем для тяговых расчетов. К этому последнему вопросу мы и переходим.

§ 70. **Спрямление профиля.** Желая ввести в учет конечную длину поезда, Чечотт¹⁾ предложил производить расчет времен хода по исправленному »тяговому« профилю, у которого переломы, как это показано на фиг. 112, были бы сглажены



Фиг. 112.

вставками

$$DE = L.$$

Такое изменение профиля несомненно приблизит расчетные кривые

$$V = \psi(s)$$

¹⁾ Чечотт. Новый способ расчета времен перегонов. 1910, стр. 167.

к действительным, но тем не менее, с предложением Чечотта едва ли можно согласиться, ибо как мы только что видели, влияние конечной длины поезда на время хода совершенно ничтожно; между тем введение в расчет всякого нового элемента профиля значительно усложняет его. Более того, это соображение заставляет нас несколько остановиться на вопросе, нельзя ли уменьшить число элементов профиля, спрямляя его, как указано на фиг. 113, что, конечно, значительно уменьшит



Фиг. 113.

работу при расчетах. За такое спрямление высказывался еще Дедуи¹⁾, и нельзя не признать, что оно имеет глубокое основание. так как, благодаря инерции поезда и его конечной длине, изменения скорости на коротких горизонталях настолько незначительны, что на площади кривой

$$\frac{1}{V} = \Psi(s)$$

они почти не отражаются. Более того, если игнорировать конечную длину поезда, то при спрямлении профиля до некоторого предела кривая

$$V = \psi(s)$$

получается ближе к действительной, чем до спрямления. Если же даже, благодаря более грубому спрямлению, эта кривая у нас исказилась бы в обратную сторону, то и это для наших целей представляется существенным только в том случае, если для нас важно получить не только верное значение времени хода

$$t = \int_0^s \frac{1}{V} ds,$$

но и правильное очертание кривой

$$V = \psi(s).$$

¹⁾ Revue Générale. 1898. II S., стр. 411.

При применении же обыкновенного способа, когда очертание кривой для нас совершенно безразлично, спрямлять профиль можно до тех пор, пока это не отразится заметным образом на времени хода.

Из сказанного делается ясным, что, вообще говоря, для точных расчетов, когда нас интересует не только время, но и очертание кривой скоростей, смягчение профиля надо вести гораздо осторожней, чем при применении обыкновенного метода. Что же касается метода эквивалентных подъемов, то он сам по существу своему есть не что-либо иное, как очень смелое спрямление профиля.

Дать какие-либо теоретические указания для спрямления профиля не представляется возможным; это с одной стороны вопрос опытности и искусства лица ведущего расчет, а с другой стороны степени точности, с которой мы хотим получить кривую

$$V = \psi(s).$$

Впрочем, раз мы ее строим, то вопрос о смягчении профиля решается очень просто попытками. На первом перегоне обычно неопытному лицу приходится 3—4 раза переделывать свой расчетный профиль пока он не получит требуемой точности; дальше же по аналогии, дело идет гораздо быстрее.

При приготовлении же профиля для расчетов по обыкновенному способу приходится прибегать к проверке на 2—3 характерных перегонах того или иного способа смягчения, путем нахождения времени хода точными способами. Примеры таких проверок приведены в конце этого параграфа. Из них и других им подобных можно вывести заключение, что на время хода то или иное смягчение отражается очень мало и потому при обыкновенном способе расчета можно прибегать к очень смелому смягчению. В частности для товарных поездов при расчете их сопротивления по формуле

$$w_0 = 1,5 + \frac{\Gamma}{20}$$

с точностью не меньшей, чем точность этой формулы можно игнорировать элементы профиля длиной

$$s \leq \frac{2000}{\sqrt{(i_d - i_c)^2}} \text{ [саж.]} \quad (*)$$

где i_d действительный подъем этого элемента, а i_c получающийся

после смягчения. Формула эта эмпирическая и ни на какое теоретическое обоснование не претендует.

При расчете обыкновенным способом времен хода пассажирских поездов можно идти еще дальше, ибо у них живая сила

$$T = (1 + \gamma) \frac{P + Q}{2g} V^2,$$

вообще говоря, значительно больше, чем у товарных, изменения же скорости при переходе с одного под'ема на другой происходят при равных прочих условиях тем плавнее, чем больше T . С другой стороны, заготовлять расчетный профиль и бланки отдельно для пассажирских и товарных поездов очень неудобно, и потому формулой (*) приходится пользоваться вообще для всех поездов. Как мы увидим из примеров, это вполне допустимо.

Раньше чем перейти к этим примерам, представляющим наиболее интересную часть настоящего параграфа, необходимо сказать несколько слов о кривых. На стр. 53 мы остановились для оценки сопротивления от них на формуле

$$k = \frac{350}{R},$$

где R в саженях; поэтому наибольшая длина кривой, которой при расчете можно пренебрегать, согласно формулы (*), равна

$$s_0 = \frac{2000}{350} = \frac{40}{7} R = 0,9 (2\pi R),$$

т. е. 0,9 полной окружности. А так как в действительности длина кривых почти никогда не достигает такой величины, то мы в праве сделать отсюда заключение, что кривые можно не выделять в отдельные элементы профиля.

Это еще не значит, конечно, что сопротивлением в них можно вовсе пренебрегать. Напротив, в каждый элемент спрямленного профиля мы должны включить влияние кривых; иными словами, мы должны сопротивление от тех кривых, которые встречаются на протяжении данного элемента профиля, распределить равномерно по всей его длине. Таким образом, если спрямленный под'ем равен $i_c^{0/100}$, то к расчету мы должны принять на этом участке

$$i_k = i_c + \frac{T_k}{s_c},$$

где T_k —работа сопротивления в кривых, расположенных в пределах спрямленного участка, отнесенная к одной тонне веса поезда.

Пользование этой формулой значительно облегчается тем обстоятельством, что работа T_k явно не зависит от радиуса. В самом деле:

$$T_k = \Sigma k s_k,$$

где s_k —длина кривых, но

$$k = \frac{K}{R}$$

$$s_k = aR,$$

где a —угол данной кривой в радианах. Поэтому

$$T_k = K \Sigma a,$$

и следовательно

$$i_k = i_c + K \frac{\Sigma a}{s_c} \dots \dots \dots 69$$

Так как на профиле углы задаются в градусах, а не в радианах, то и в этой формуле вместо радианов желательно иметь градусы. Как известно, число градусов центрального угла

$$\beta \approx 57a$$

откуда при $K = 350$ и s_c в саженях

$$K \frac{\Sigma a}{s_c} \approx 6 \frac{\Sigma \beta}{s_c}$$

и

$$i_k = i_c + 6 \frac{\Sigma \beta}{s_c} \dots \dots \dots 69a$$

Формула 69 между прочим показывает, что спрямленный тяговой профиль будет неодинаков для четного и нечетного направления, ибо, если в четном направлении мы имеем $+ i_c$, и следовательно

$$i_k = i_c + 6 \frac{\Sigma \beta}{s_c}$$

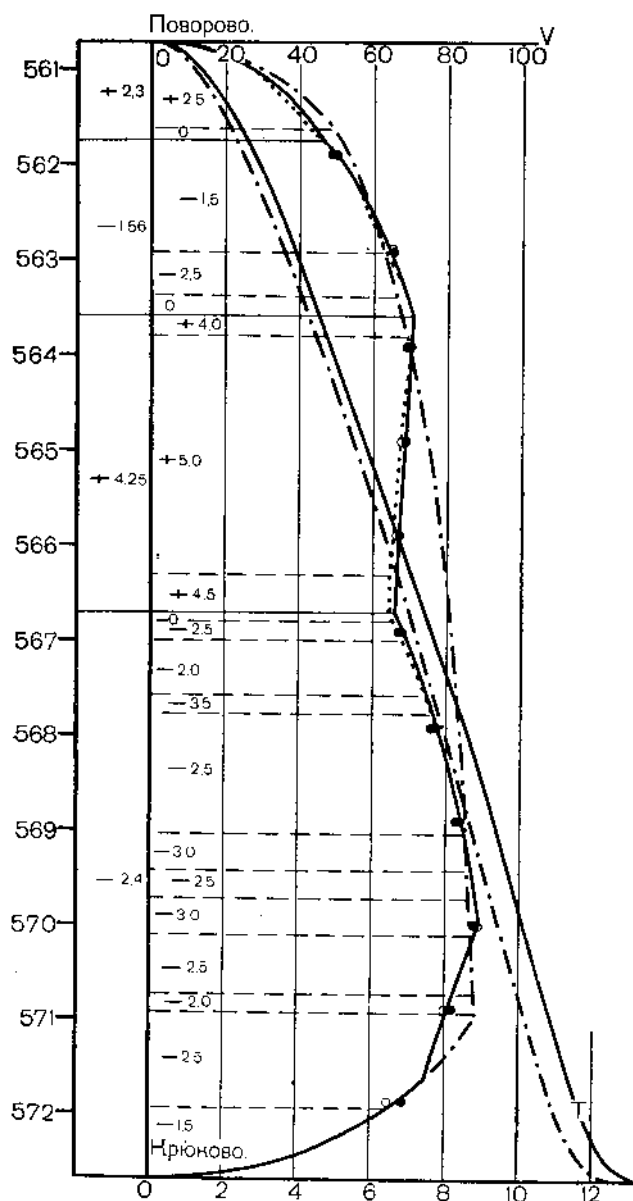
то в нечетном— i_c т. е.

$$i_k = -i_c + 6 \frac{\Sigma \beta}{s_c}$$

Пример 11. Выяснить наиболее целесообразный способ смягчения профиля на перегоне Поворово—Крюково для расчета

времени хода дачного поезда, согласно заданий, изложенных на стр. 168.

На фиг. 114 в первой графе слева показан спрямленный



Фиг. 114.

профиль (фиг. 78), по которому мы вели все наши расчеты; соответственные же кривые V и t , построенные на фиг. 84 по

способу Липеца-Лебедева, воспроизведены здесь пунктиром из одних точек. Во второй графе показан истинный профиль этого перегона, по которому вновь были построены сплошные кривые V и t , совпавшие на всем почти протяжении с кривыми из одних точек. На той же фигуре пунктиром из тире и точек изображены кривые V и t для полного спрямления нашего перегона, т. е. для замены его профиля одним средним под'емом.

Из этой фигуры видно, что время хода, подсчитанное по истинному профилю

$$T = 13,5',$$

по принятому нами раньше (пунктир из одних точек)

$$T = 13,3'$$

и по наиболее грубо спрямленному

$$T = 12,7.$$

Таким образом оказывается, что на время хода то или иное спрямление профиля перегона Поворово-Крюково, не исключая и самого грубого, не оказывает заметного влияния.

Совершенно иначе обстоит дело с кривой

$$V = \psi(s).$$

Как мы видели на фиг. 84, кривая эта, построенная по расчетному профилю, почти сливается с опытными точками, нанесенными и на фигуру 114. Кривая, построенная по истинному профилю, подходит к ним тоже очень близко; кривая же, соответствующая грубому спрямлению, имеет совершенно другой характер. Поэтому, если нам нужно получить только время хода и притом с точностью не более чем до $\frac{1}{2}$ минуты, вид же кривой

$$V = \psi(s)$$

нам безразличен, то профиль данного участка можно спрямлять любым образом, хотя бы и самым грубым. Но в таком случае зачем же прибегать к графическим построениям? Ведь время хода для этого случая, как мы видели из таблицы XXX (стр. 234), можно с достаточной точностью определить и методом эквивалентных под'емов, который по существу можно скорее считать особым способом спрямления профиля, чем особым способом расчета времен хода.

Если же для нас важно получить более или менее правильное очертание кривой

$$V = \psi(s),$$

то идти так далеко в спрямлении профиля уже нельзя. Впрочем некоторое спрямление и для этой цели полезно. Так из фигуры 114 мы видим что кривая из одних точек, построенная по тому профилю, который изображен на фиг. 78, и которым мы пользовались при всех предыдущих расчетах, во всяком случае подходит к опытным точкам не хуже сплошной кривой, построенной по точному профилю. Между тем ее построение требует раза в два больше времени, чем пунктирной кривой.

Интересно отметить, что спрямление, принятое на фиг. 114, и давшее в применении к дачному поезду столь благоприятные результаты в смысле кривой

$$V = \psi(s),$$

удовлетворяет формуле

$$s \geq \frac{2000}{\sqrt{(i_a - i_c)^2}} \quad (*)$$

Правда, на первый взгляд оно представляется гораздо более осторожным, чем это допускается формулой (*), ибо наиболее резко спрямляемый элемент (с $i = -2,5$ до $i_a = -1,56$) имеет $s = 115$ саж. (563—564 вер.), в то время как для таких значений i_c и i_a формула (*) дает

$$s = \frac{2000}{0,94} \approx 2100 \text{ [саж.]}$$

С другой стороны следующим по грубости спрямлением для нашего перегона является уже соединение отметок обеих станций прямой, что уже выходит за пределы, допускаемые формулой (*). В самом деле, при таком спрямлении под'ем $i_k = +4,25$ саж. длиной 1560 саж. спрямляется до $i_a = +0,2$, между тем как по формуле (*) такое спрямление можно применять только для

$$s \leq \frac{2000}{4,05} \approx 500 \text{ [саж.]}$$

Никакого же среднего спрямления между самым грубым и изображенным на фиг. 78 придумать нельзя.

Пример 12. Выяснить, как будут велики колебания скорости опытного поезда I цикла весом 1400 тонн, ведомого паровозом 1-4-0 Ш², на участке Тверь—Лихославль Ник. ж. д. при неизменном сохранении комбинации 1-0,3.

Задача эта сводится к возможно более точному построению кривой

$$V = \psi(s),$$

и потому вопрос о спрямлении профиля для правильного ее решения приобретает особую остроту.

Также как и в предыдущем примере, для этого случая на листе III, приложенном в конце книги построены кривые V и t для трех профилей

- 1) действительного;
- 2) спрямленного применительно к формуле (*) и
- 3) спрямленного в одну линию.

Что же касается значений V , наблюдавшихся во время испытания комбинации 1—0,3, то, благодаря тому, что сопротивление опытного поезда при расчете было значительно переоценено, они лежат значительно выше расчетных; характер же изменения V наиболее подходит к кривой 2, хотя повидимому несколько более грубое спрямление могло бы дать еще большее совпадение.

Что же касается времен хода, то самое грубое спрямление дает

$$T = 95',$$

а оба других

$$T = 96'.$$

Нельзя, однако, не отметить, что оба эти примера, судя по которым то или иное спрямление не отражается вовсе на времени хода, относятся к главной линии Николаевской ж. д., трассированной по преимуществу настолько мягкими подъемами, что естественно возникает сомнение, приложимы ли выводы, которые мы сделали из них, к большинству русских дорог. Это заставляет нас разобрать еще один пример с более пересеченным профилем.

Пример 13. Выяснить наиболее целесообразное смягчение профиля порегона Батаино—Фирово Полоцкой линии Николаевской ж. д. для расчета времени хода товарного поезда весом 61000 пуд. при паровозе 0—4—0 Н^ч.

Чтобы не затемнять чертежа, построим кривые V и t по способу Липеца-Лебедева только для двух спрямлений профиля, из которых одно удовлетворяет формуле

$$s \leq \frac{650}{\sqrt{(i_d - i_c)^2}},$$

что значительно строже нашей основной формулы

$$s \leq \frac{2000}{\sqrt{(i_d - i_c)^2}} \dots \dots \dots (*)$$

а другое — формуле

$$s \leq \frac{4100}{\sqrt{(i_d - i_c)^2}}$$

что представляет из себя уже более грубое спрямление, чем это позволяет формула (*). Кривые для первого спрямления нанесены на листе III, приложенном в конце книги сплошными линиями, а для второго — пунктиром из одних точек. Там же пунктиром из тире и точек приведены и кривые, имевшие место во время четырех опытных поездок.

Из этого чертежа видно, что для обоих спрямлений

$$T = 32',$$

среднее же из опытных поездок

$$T = 34.$$

Что же касается кривых V , то для первого спрямления опытные кривые очень хорошо сходятся с расчетной, а для второго резко расходятся.

Таким образом и этот пример подтверждает сказанное на стр. 249 и 254. Для определения времени хода профиль можно спрямлять очень грубо. Для того же чтобы получить надежную кривую

$$V = \psi(s),$$

спрямление приходится производить в гораздо более тесных пределах, однако и в этом случае вести расчет по реальному профилю нет никакого основания. Не говоря уже о потере времени, надо помнить, что некоторое спрямление профиля приближает кривую скоростей к действительности, а не удаляет от нее.

ГЛАВА VIII.

Определение расхода воды и топлива.

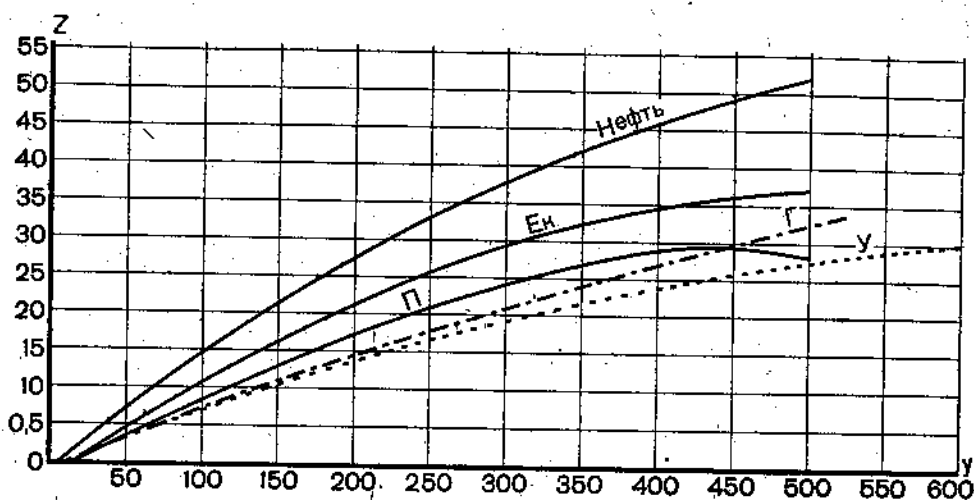
§ 71. Сущность этих расчетов. В главе II в достаточной степени было выяснено, что сила тяги паровоза, или точнее, степень форсировки котла z может колебаться в зависимости от произвола машиниста в довольно широких пределах. В предыдущей главе было показано, каким образом, задавшись определенным законом изменения F , можно подсчитать время, нужное для прохода поезда данного веса от станции до станции. Очевидно, однако, что задаваясь разными законами для F мы тем самым изменяем и среднее z , а следовательно и расход топлива. Поэтому при выяснении вопроса о наивыгоднейшем использовании данного типа паровоза необходимо для разных способов его утилизации подсчитывать не только время хода, но и расход топлива.

Эти же расчеты полезно производить и при установлении норм на топливо, что, к сожалению, у нас почти никогда не делается. В этом случае, конечно, надо задаваться средним весом поезда, определяемым статистическим путем, и z соответствующим этому весу и заданному расписанию времени хода. Что же касается расхода воды, то его приходится определять, во-первых при расчете водоснабжения, а во-вторых при выяснении пунктов набора воды. В первом случае приходится задаваться наибольшими возможными Q и z ; а во втором — принятым в эксплуатации Q и, на случай плохой погоды и опозданий, наибольшим z . Впрочем z влияет на количество воды, расходуемой поездом данного веса на данном участке; сравнительно мало.

Переходя к приемам определения расхода воды и топлива, отметим прежде всего, что последний расход всегда определяется по первому помощью зависимости

$$z = \phi(y), \quad \dots \dots \dots 70$$

изображенной для нормального паровоза на фиг. 18. Определив тем или иным способом среднюю форсировку котла за поездку



Фиг. 18. ОВ, (см. стр. 37).

z_c по ней, имея для данного топлива зависимость 70, легко найти и y_c . Искомый же расход топлива за поездку

$$E = y_c GT, \quad \dots \quad 71$$

где T соответственное время хода.

Против такого способа определения E , естественно, возникает то соображение, что среднее за поездку z соответствует на кривой

$$z = \phi(y)$$

среднему y только в том случае, если эта кривая обращается в прямую. Дело, однако, в том, что, во-первых, эти кривые в той части, которая соответствует обычным условиям практики, близки к прямым, а во-вторых, что по способу своего построения они в сущности представляют из себя кривые

$$z_c = \phi(y_c),$$

а не

$$z = \phi(y_c),$$

ибо на опытах определяется расход пара и топлива за целую поездку, т. е. z_c и y_c , определить же мгновенные значения z и y невозможно.

Что же касается расхода пара и воды, то он определяется ими по средней форсировке или по комбинациям ϕ и ε , в зависимости от того, как определялась сила тяги при расчете T .

§ 72. Расчет расхода пара по z_c . Если бы расчетная степень форсировки котла z_p оставалась действительно постоянной, то расход пара определялся бы очень просто из формулы

$$B = z_p H T \dots \dots \dots 72a$$

Дело, однако, в том, что часть пути паровоз проходит при закрытом регуляторе; поэтому в формулу 72 во всяком случае вместо T надо поставить

$$t_n = T - t_o,$$

где t_n время хода с открытым, а t_o с закрытым регулятором. С другой стороны и формула

$$B = z_p t_n H \dots \dots \dots 72b$$

не представляется точной, ибо, как это ясно из фигуры 115, относящейся к индикаторной силе тяги при движении по подъемам от i_n до i_m с предельной дозволенной скоростью V_m нам поневоле приходится пользоваться значениями

$$z < z_p;$$

поэтому среднее за всю поездку значение форсировки котла

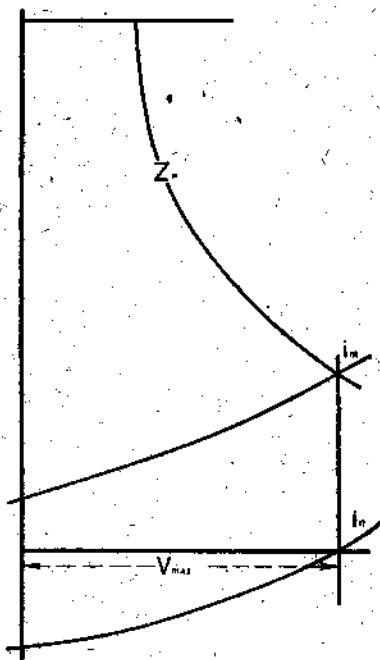
$$z_c < z_p$$

выражается формулой

$$z_c = \frac{\sum z t}{\sum t} \dots \dots \dots 73$$

где t время, проходимое при определенной форсировке котла. Если суммирование распространено только на участки, проходимые с открытым регулятором, то

$$\sum t = t_n$$



Фиг. 115.

и в этом случае

$$B = z_c t_n H = H \Sigma z t \dots \dots \dots 74$$

Если же суммирование распространено и на участки, проходимые без пара, то

$$\Sigma z t = T$$

и

$$B = z_c H T; \dots \dots \dots 72$$

но так как $\Sigma z t$ в обоих случаях остается без изменения, то за силой формулы 73 мы по старому имеем

$$B = H \Sigma z t \dots \dots \dots 74$$

Наиболее удобный способ подсчета $\Sigma z t$ состоит в том, что на основании фиг. 115 составляется для поезда данного веса кривая

$$z = \varphi(i_k), \dots \dots \dots 75$$

напоминающая собой по идее кривую

$$\frac{60}{V} = \psi(i_k),$$

которую мы строили при расчете времен перегонов обыкновенным способом. Построение кривой φ проще всего вести, исходя из кривой

$$F = \phi'(z),$$

построенной на основании кривых

$$F = \varphi_k(z, V)$$

для наибольшей дозволенной скорости V_m . Дело в том, что при постоянной скорости, полное сопротивление поезда данного веса

$$W = (w_0 + i_k)(P + Q)$$

есть функция только одного под'ема. Поэтому, имея для $V = V_m$ такую зависимость

$$W = f(i_k), \dots \dots \dots (*)$$

а также зависимость

$$F = \phi'(z), \dots \dots \dots (**)$$

мы на основании уравнения установившегося движения

$$F = W \dots \dots \dots \text{II}$$

легко можем получить искомую зависимость

$$z = \varphi(i_k) \dots \dots \dots 75$$

Совместное решение уравнений (*) и (**) графическим путем сводится к пересечению кривой

$$F = \phi'(z)$$

горизонтальными прямыми

$$W = (w_0 + i_k)(P + Q)$$

для разных i_k и $V = V_m$. Можно, конечно, все эти операции производить и не с абсолютными значениями F и W , а с удельными, т. е. исходить из нашей основной формы уравнения установившегося движения

$$f = w_0 + i \quad \dots \dots \dots \text{II}_y$$

и засекать кривую

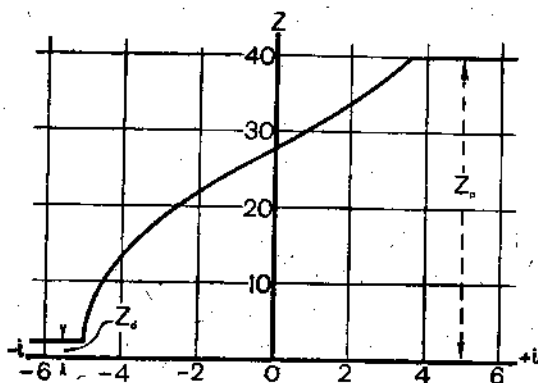
$$f = \phi(z)$$

при $V = V_m$ горизонтальными прямыми $w_0 + i_k$ для разных z . Это однако менее удобно.

Так или иначе, но в результате всех этих построений мы получаем кривую

$$z = \varphi(i_k),$$

имеющую очертание, показанное на фиг. 116. Заслуживает внимания



Фиг. 116.

мания тот факт, что эта кривая не должна пересекать ось i_k ; при уменьшении же i_k за некоторый предел она должна становиться параллельной оси абсцисс. Иными словами даже на самых крутых уклонах мы имеем

$$z = z_0 > 0.$$

Это объясняется тем, что и при закрытом регуляторе паровоз расходует в час некоторое количество пара

$$z_0 H$$

на сифон, тормаз, форсунку, подогревание нефти и т. п.

Но если это так, то естественно возникает вопрос, имеем ли мы право наше основное условие постоянства z писать под видом

$$U = zH.$$

и не следовало ли бы его представить под видом

$$U = (z - z_0) H.$$

Это замечание совершенно правильно, и до сих пор поправка на z_0 не вводилась в наши формулы только для того, чтобы этой мелочью ($z_0 \approx 2$) не отвлекать внимание читателя от существа рассматриваемых явлений. Когда же по данным опытов строятся кривые

$$F_k = \varphi_k(z, V),$$

то кривые

$$u = \psi(V)$$

фактически пересекаются не гиперболами

$$uV = \frac{\pi z H D}{10^6 \kappa} \quad 136$$

(см. стр. 33), а гиперболами

$$uV = \frac{\pi D}{16^6 \kappa} (z - z_0) H \quad 130$$

Надписи же, которые стоят на кривых

$$F_k = \varphi_k(z, V),$$

приведенных в паспортных книжках, относятся не к котловому z , обозначаемому часто во избежание недоразумений через z_k , а к разности $z_k - z_0$, которую называют машинным z и обозначают z_m . Поэтому, пользуясь для расчетов кривыми

$$F_k = \varphi(z_m, V),$$

приведенными в паспортных книжках, необходимо сначала построить кривые

$$F_k = \varphi(z_k, V)$$

на основании кривых

$$z_k = f(z_m),$$

также приведенных в паспортных книжках.

Величина $z_k - z_m$ не постоянна и растет с увеличением z_m примерно по закону:

$$z_k = a + bz_m,$$

где b больше единицы.

Условимся символом z_0 обозначать z_k при закрытом регуляторе ($z_m = 0$). Тогда:

$$z_k = z_0 + bz_m.$$

Значения величины ε_0 для наиболее распространенных русских паровозов приведены в таблице XXXIII.

Таблица XXXIII. Значения z_0 .

Паровоз Отопление	С	К	Ку	Б	Уу	Ну	Нв	О	Щ	Ы
Угольное и дровяное	0,5	0,5	—	0,5	—	0,7	0,7	0,7	0,4	—
Нефтяное летом	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	—	0,5
Нефтяное зимой	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	—	1,5

При наличии кривой

[illegible]

нахождение

 $B = H \Sigma z l$ 74

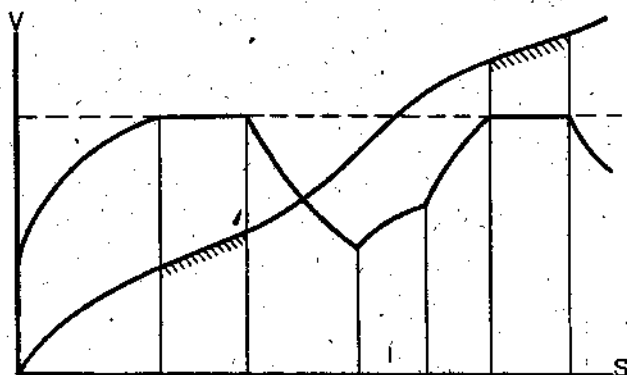
не представляет никаких затруднений. При этом, если расчет ведется обыкновенным способом, то значения z из кривой 75 можно даже выписывать в бланк расчета (стр. 199) для чего в нем надо прибавить три графы: z , zt и B . Если же расчет ведется графически, то прежде всего надо, пользуясь кривыми

$$V = \psi(s),$$

H

$$t = x(s),$$

выделит, как показано на фиг. 117, те элементы времени, для



Φμz. 117.

которых скорость равна V_m , отмеченной на этой фигуре пункти-

ром; и для них затем подобрать z , сообразно тому, какими значениями F на этих участках пользовались при построении кривых

$$V = \psi(s)$$

и

$$t = \chi(s).$$

Пример 14. Построить диаграмму

$$z = \varphi(i_k)$$

для паровоза 1—3—1 С при обслуживании им курьерского поезда весом 350 тонн с предельной скоростью 100 km/h и $z_p = 50$.

Согласно фиг. 30 (стр. 82) удельное сопротивление паровоза 1—3—1 С при $V = 100$

$$w'_0 = 6,9;$$

удельное же сопротивление восьмиколесных вагонов при такой скорости согласно формуле автора (стр. 76)

$$w''_0 = 1,5 + 0,2 V \frac{V + 100}{1000} = 6,5.$$

Поэтому сопротивление всего нашего поезда, как системы повозок, при $V \approx 100$ на площадке

$$W_0 = Pw'_0 + Qw''_0 = 6,9 P + 6,5 \cdot 350;$$

а так как $P = 125$ т, то

$$W_0 = 3140.$$

На под'еме же i_k

$$W = W_0 + (P + Q) i_k = 3140 + 475 i_k.$$

С другой стороны, при установившемся движении

$$F_k = \varphi(z, V) = W$$

и потому в нашем случае i_k и z связаны уравнением

$$\varphi'(z) = 3140 + 475 i_k \dots \dots \dots 75x$$

Если бы зависимость

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

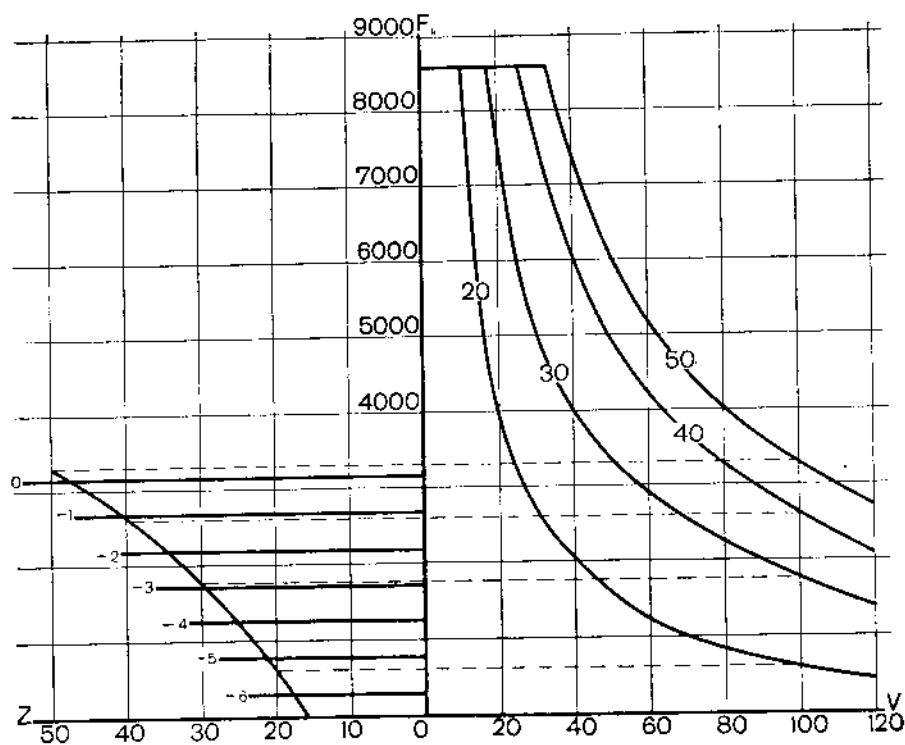
была нам задана в виде формулы, получение уравнения 75х исчерпывало бы нашу задачу. Дело однако в том, что на «паспортах» зависимость

$$F_k = \varphi_k(z, V)$$

дается не в виде формулы, а в виде пучка кривых. В частности для »Прери« они имеют вид, показанный на правой стороне фиг. 118. Впрочем построение на основании этих кривых кривой

$$F_k = \varphi'(z)$$

для $V=100$ не встречает никаких затруднений. Для этого достаточно перенести значения F_k для $z=20, 30, 40, 50$, как это показано на фиг. 118 пунктиром, на соответственные места левой ее стороны, где за ось абсцисс принята ось z .



Фиг. 118. 1-3-1 C; $q=350$.

Для того же, чтобы от кривой

$$F_k = \varphi'(z) \quad (**)$$

для $V=100$ перейти к искомой зависимости

$$\varphi_k(z) = W - 3140 + 475 i_k$$

строим ряд горизонтальных прямых

$$W = 3140 - 475 i_k \quad (*)$$

для $i_k = -1, -2, \dots$ как показано на фиг. 118. Точки пересечения их с построенной нами кривой

$$F_k = \varphi_k(z)$$

для $V=100$, удовлетворяя одновременно уравнениям (*) и (**), удовлетворяют тем самым и уравнению 75х. Таким образом путем измерения по фиг. 118 значений z соответствующих этим точкам пересечения, мы получим для разных i_k искомые нами значения z . Они приведены в таб. XXXIV.

Таблица XXXIV.

Уклон i_k	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$W = 3140 + 475 i_k$	3140	2660	2190	1710	1240	760	290
z	47,5	40,0	34,3	29,4	25,0	21,4	17,5

Так как для $z < 20$ опытных данных нет, то уже для определения z соответствующего 0,006 уклону приходится прибегать к некоторой экстраполяции. Это обстоятельство на первый взгляд делает невозможным построение искомой нами кривой

$$z = \varphi(i_k)$$

для $z < 17,5$. Из этого затруднения, однако, можно выйти, определив тот уклон i_k , для которого $z = z_0$, т. е. по которому наш поезд пойдет с $V=100$ при закрытом регуляторе. Для определения его мы имеем уравнение

$$F_7 = (w'_n + w'_m) P + w'_n Q + (P + Q) i_n = 0,$$

при чем для паровоза С согласно сказанному на стр. 84

$$w'_n + w'_m = 3 + 0,04 V + 0,0006 V^2 + 0,000013 V^3;$$

последняя формула при $V=100$ дает

$$w'_n + w'_m = 26,$$

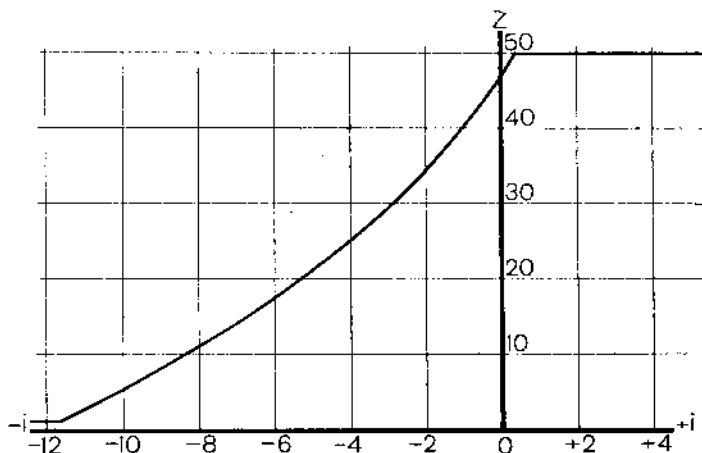
откуда

$$i_n = -11,6.$$

Таким образом для построения кривой

$$z = \varphi(i_k)$$

мы имеем 8 точек: 7 из таблиц XXXIV и одну при $i_k = i_n$, т. е. при $z = z_0$. Построенная таким образом кривая приведена на фиг. 119. Против нее можно сделать, однако, то возражение



Фиг. 119. $I-3-I$ C; $Q=350$.

что в ней отсутствует скачок, который должен характеризовать закрытие регулятора. Дело в том, что в этот момент непрерывность функции

$$W_0 = f(V)$$

нарушается и она сразу при том же V после значения

$$W_0 = (w'_0 + w_m) P + w''_0 Q$$

принимает значение

$$W'_0 = (w'_0 + w'_m) P + w''_0 Q,$$

где

$$w'_m > w_m.$$

Практическое значение этого обстоятельства, впрочем, ничтожно, а главное у нас нет опытных данных для его учета. Поэтому мы и впредь будем строить

$$z = \varphi(i_k)$$

без этого скачка, как и в данном случае.

Пример 15. Определить расход воды и нефти паровозом № при обслуживании скорого поезда весом 460 тонн на участке Серпухов—Тула согласно заданий, изложенных на стр. 190.

Так как расчет времен хода для этого участка при $z = 50$ мы делали и способом Липеца и обыкновенным, то расход воды

подсчитаем применительно к обоим этим приемам. Начнем с первого. При построении кривых

$$V = \varphi(s)$$

и

$$t = \chi(s),$$

приведенных на листе I, приложенном в конце книги, ни разу не пришлось пользоваться значениями силы тяги, отвечающими

$$z < 50.$$

Иными словами на всем протяжении от Серпухова до Тулы мы имели только два $z = z_p = 50$ и $z = z_0 = 2$. Первому соответствует $t = 92,2'$, а второму $17'$. Поэтому согласно формулы

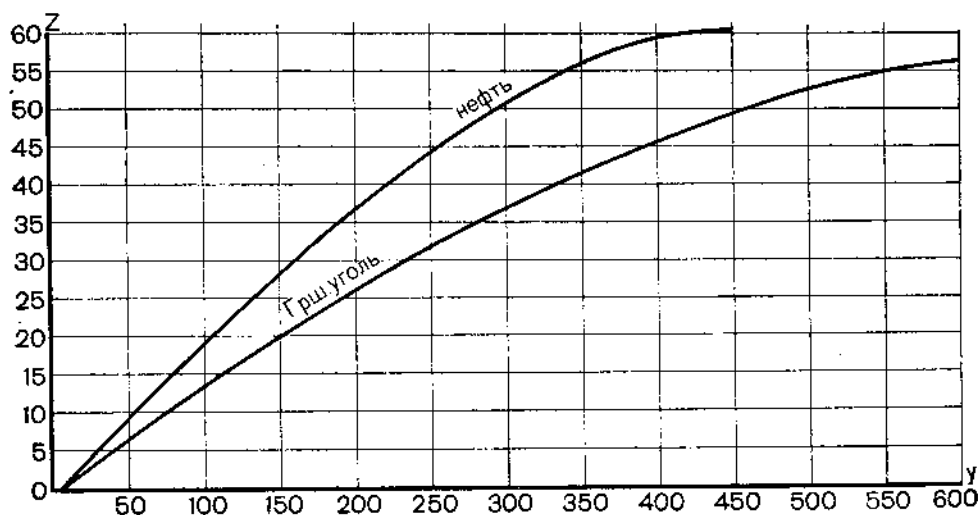
$$B = H \Sigma \chi t \quad 74$$

мы имеем

$$B = \frac{156,8}{60} (50 \cdot 92,2 + 2 \cdot 17) = 12100 \text{ kg}$$

$$z_c = \frac{60B}{HT} = \frac{60 \cdot 12100}{156,8 \cdot 109,2} = 42,2.$$

Что же касается расхода нефти, то согласно фиг. 120 $z_c = 42,2$ соответствует



Фиг. 120. 1-3-0. Нш.

$$y_c = 240,$$

откуда

$$E = y_c GT = 1140 \text{ kg.}$$

При опытной же поездке № 36 непосредственное измерение дало

$$B = 13100,$$

$$E = 1235,$$

т. е. на 8% больше, что обуславливается значительным пропуском пара во время этой поездки (см. стр. 193).

Определим теперь B и E вторично, пользуясь данными обыкновенного способа расчета времен хода. Для этого прежде всего надо построить кривую

$$z = \varphi(i_k),$$

а затем для разных z подсчитать значения zt . Из фиг. 98 видно, что $V = 100$ в нашем случае достигается при $z = 50$ только на

$$i_m = -5,9.$$

Что же касается уклона i_n по которому наш поезд пойдет с $V = 100$ без пара, то он найдется из уравнения

$$P(w'_0 + w_m) + Qw''_0 + (P + Q)i_n = 0,$$

что при

$$w'_0 = 7,$$

$$P = 100,$$

и

$$w'_0 + w''_m = 26,$$

$$Q = 460,$$

дает

$$i_n = -10,5.$$

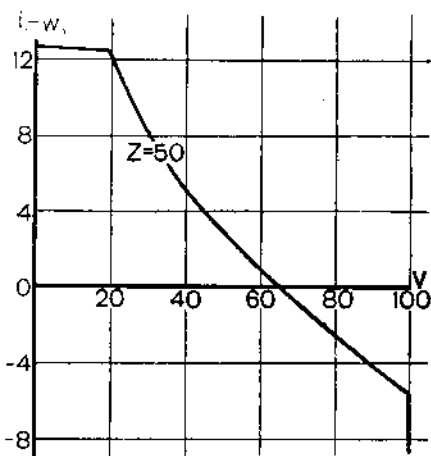
Таким образом в нашем случае уменьшенными z приходится пользоваться только при уклонах от 5,9 до 10,5 ‰. А так как их в этом случае сравнительно немного, то, не рискуя впасть в серьезную ошибку, можно принять, что z в этих пределах изменяется по закону прямой. Так и построена диаграмма

$$z = \varphi(i_k),$$

приведенная на фиг. 121.

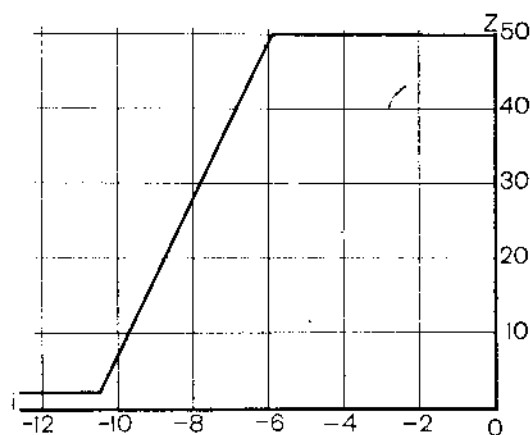
Выпишем теперь из таблицы времена хода по уклонам

$$i_k < -5,9$$



Фиг. 98. Пш.

и по ним с помощью фиг. 121 подсчитаем, как показано в



Фиг. 121. $Hq; Q=460$.

таблице XXXV, величину

$$\sum zt$$

для элементов пути проходимых с

$$z < 50.$$

Таблица XXXV.

Станция	i_k	t	z	zt
Серпухов	-8,0	2,06	28	57,7
	-11,3	0,26	2	0,52
Ока				
Свинская				
Тарусская				
	-6,0	0,75	49	36,7
	-7,0	0,66	38,5	25,4
Пахомово				
	-7,9	1,10	28,5	31,3

Станции	t_k	t	z	zt
Шульгино	-8,6	0,90	21,5	18,4
Лаптево	-6,5	0,64	44	28,2
	-8,5	0,82	23	18,8
	-7,5	0,81	34	27,5
Ревякино	-6,4	1,50	45	67,5
	-7,5	0,89	33	29,4
Хомиково	-6,4	0,53	44,5	28,6
	-7,7	4,85	30,5	147,7
Тула				
Итого . .	—	17,9	—	517,0

На стр. 215 для этого участка мы нашли

$$T = 124,4,$$

откуда время хода при $z = 50$

$$T' = 124,4 - 17,9 = 106,5$$

и соответственное

$$\Sigma zt = 5325.$$

Полное же

$$\Sigma zt = 5325 + 517 = 5840 \text{ kg.}$$

откуда

$$B = \frac{H}{60} \Sigma zt = 15150 \text{ kg.}$$

$$z_c = 47$$

$$y_c = 270$$

$$E = \frac{G y_c}{60} = T 1440 \text{ kg.}$$

Таким образом расход пара и нефти при обыкновенном способе расчета времен хода получился у нас на $25-27\%$

больше, чем при способе Липца, или на 16—17% больше, чем мы имели во время поездки № 36, несмотря на пропуск пара.

Этот пример весьма наглядно показывает, насколько обыкновенный способ преувеличивает расходы воды и топлива. Этого, впрочем и следовало ожидать, ибо, во-первых, он вовсе не учитывает искусство машиниста, а во-вторых, при нем расчет расходов идет от времени, которое в свою очередь при этом способе всегда заметно преувеличено (см. стр. 237).

Пример 16. Нужно ли при обслуживании паровозом 1—3—0 Н^у скорого поезда весом 460 тонн согласно заданий, изложенных на стр. 190, производить на участке Серпухов—Тула набор воды на промежуточных станциях?

Наибольший из определенных нами расходов пара

$$B = 15150;$$

прибавляя к этому расходу 5% на потерю воды инжекторами и 10% на всякие случайности, получаем расход воды

$$B' = 17300 \text{ kg} \approx 17,3 \text{ m}^3.$$

Номинальная емкость 4-х осного тендера Н^у—23 м³, полезная же, если считать, что последний кубический метр можно израсходовать не при всяких инжекторах, —22 м³, что больше B'. Поэтому набор воды безусловно не нужен.

Пример 17. Можно ли выдержать расписание скорого поезда на участке Серпухов—Тула, установленное в таблицах XVIII и XXXI, при отоплении паровоза Н^у Гришинским углем, и как будет велик эквивалент этого угля при таких условиях по отношению к нефти?

Кривая

$$z = \phi(y)$$

для Гришинского угля, приведенная на фиг. 121, пересекает горизонталь $z = 50$, поэтому, вообще говоря, на первый из поставленных вопросов надо ответить удовлетворительно. Но с другой стороны, тот факт, что опытная кривая для нефти подымается за $z = 60$, а угольная только до $z = 57$ указывает, что степень надежности при выполнении нашего расписания будет различная, и действительно от поездки № 410, 14 июля 1914 г., когда на Гришинском угле было достигнуто $z = 57$, у меня осталось такое впечатление, что это уже предел, который не только превзойти, но и достичь в регулярной службе почти невозможно. При $z_c = 42,2$ на Гришинском угле

$$y_c = 355,$$

откуда

$$E = yGT = 1690 \text{ [пуд.]},$$

что на 38% больше, чем мы имели для нефти. Поэтому для рассматриваемых условий эквивалент Гриппинского угля равен 138, т. е. 138 пуд. этого угля при обслуживании скорого поезда весом 460 тонн на участке Серпухов—Тула паровозом 1—3—0 Н^у дают тот же эффект, как 100 пуд. нефтяных остатков.

Пример 18. Определить расход пара и нефти нормальным паровозом при обслуживании на участке Бологое II—Осташков Ник. ж. д. полногрузного поезда весом 870 тонн при $z_p = 20$.

Пользуясь теми же самыми приемами, как и в предыдущих примерах, формулой

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}$$

и определяя время способом Липеца, получаем цифры, приведенные в таблице XXXVI. Там же приведены и средние из результатов 2 опытных поездок,

Таблица XXXVI.

	z	t	B	E
Расчетные	20	361	16 750	1450
Средняя из поездок	25	327	16 055	1305
Разница в %	+ 20	9	— 4	10

из которых видно, что несмотря на нагон 34' против расписания, благодаря применению наивыгоднейших комбинаций мы имели 4% экономии в паре и 10% в нефти.

Пример 19. Определить расход пара и нефти тем же паровозом на перемещение поезда весом 870 тонн из Осташкова в Бологое II при $z_p = 40$.

Результаты расчетов, произведенных тем же способом, как и в предыдущем примере, и средние из результатов 3-х поездок приведены в таблице XXXVII.

Оба эти примера наглядно показывают какую экономию в топливе при »перевалистом« профиле может дать нарушение

Таблица XXXVII.

	z	t	B	E
Расчетные	32	257	16 530	1470
Средняя из поездов	32	242	12 650	1060
Разница в $\frac{0}{10}$	0	- 6	23	28

условия

$$z = \text{пост.}$$

§ 73. Расчет расхода пара по комбинациям. Выше указывалось, что расход пара машиной в час

$$U = \kappa \frac{10^6 \Gamma}{\pi D} u;$$

поэтому расход пара на 1 километр пути равен

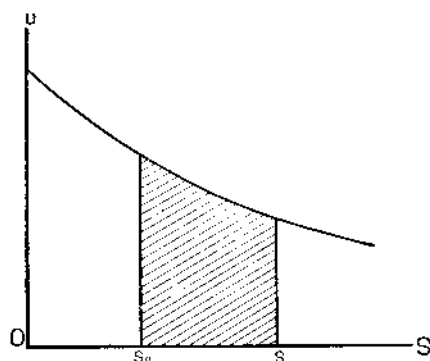
$$\frac{10^6 \kappa}{\pi D} u,$$

на элемент ds

$$\frac{10^6 \kappa}{\pi D} u ds$$

и на протяжении участка длиной $s - s_0$ километров

$$B_m = \frac{10^6 \kappa}{\pi D} \int_{s_0}^s u ds \quad 76$$



Фиг. 122.

Квадратура, входящая в эту формулу, есть не что-либо иное, как площадь кривой

$$u = \phi(s)$$

между двумя ординатами, соответствующими абсциссам s_0 и s (фиг. 122). Величина же

$$\frac{10^6 \kappa}{\pi D} = C$$

для данного паровоза постоянна. Таким образом расчет расхода пара по комбинациям

сводится к построению

$$u = f(s)$$

для данного перегона.

Для возможности произвести такое построение необходимо знать, во-первых, в каких местах пути меняются комбинации и как именно, во-вторых, зависимость для каждой комбинации

$$u = \phi(V)$$

и, в третьих, закон изменения скорости на перегоне, т. е. зависимость

$$V = \psi(s).$$

Из сказанного следует, что рассматриваемый метод определения B_m применим лишь к случаю, когда время хода определялось по

$$F = \varphi(\varrho, \varepsilon, V),$$

а не по

$$F = \varphi_k(z, V),$$

и кроме того, что его наиболее удобно применять при тех способах интегрирования уравнения движения поезда, которые дают непосредственно

$$V = \psi(s).$$

При наличии этой зависимости, построение в пределах каждой комбинации по кривой

$$u = \phi(V)'$$

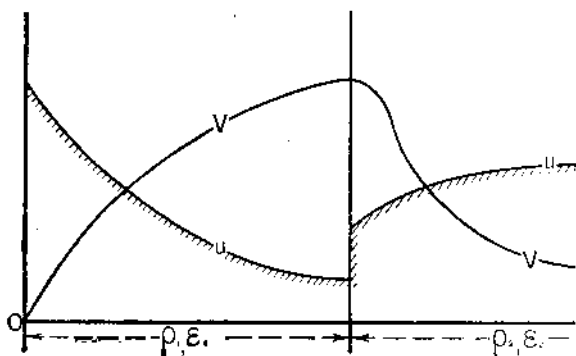
кривой

$$u = f(s)$$

и нахождение по ней

$$B_m = C \int_{s_0}^s u ds \dots \dots \dots 76a$$

не представляет никаких затруднений.



Фиг. 123.

Нас, однако, сейчас интересует не расход пара машиной, а полное количество пара, образованное котлом

$$B = B_m + \Sigma b, \dots \dots \dots 77$$

где Σb сумма потерь пара на сифон, тормаз, форсунки, подогреватель нефти и т. п. Зависимость 77 может быть раскрыта опытным путем. В частности, при опытах над типами русских паровозов она дается под видом

$$z = a + bz_m, \dots \dots \dots 78$$

где a и b коэффициенты постоянные для данного типа и топлива. В паспортных книжках зависимость $z = f(z_m)$ дается непосредственно в виде кривой. Помножая же все члены уравнения 78 на HT , мы получаем

$$B = aHT + bB_m \dots \dots \dots 78a$$

Пример 15. Определить расход пара и нефти паровозом 1—3—0 Н^у при обслуживании скорого поезда весом 460 тонн согласно задания, изложенного на стр. 190.

На листе I, приложенном в конце этой книги, нанесена кривая

$$u = f(s)$$

в масштабе

$$1 \text{ [km]} = 12 \text{ [mm]}$$

$$1 \text{ [kg]} = 25 \text{ [mm]},$$

при чем площадь этой кривой

$$\omega = 982 \text{ [mm]}^2.$$

Отсюда следует, что в системе km, kg

$$\int_{s_1}^s u ds = \frac{982}{25 \cdot 12} \dots 3,27.$$

Что же касается величины

$$C = \frac{10^6 \kappa}{\pi D},$$

то для паровоза 1—3—0 Н^у (системы компаунд с 2 цилиндрами), у которого

$$\kappa = 2$$

$$D = 1900 \text{ [mm]},$$

$$C = \frac{2000000}{\pi \cdot 1900} = 335.$$

Поэтому

$$B_m = C \int_{s_0}^s u ds = 11000 \text{ [kg]}.$$

Переходя к B , воспользуемся указаниями опытов над паровозом Н⁸, согласно которым в формуле

$$z = a - bz$$

$$a = 2$$

$$b = 1,$$

откуда при $T = 111' = 1,84 \text{ [h]}$ и $H = 156,8 \text{ [m]}^2$

$$B = aHT + bB_m = 580 + 11000 = 11580.$$

Это соответствует

$$z_e = 38,5$$

$$y_e = 213$$

$$E = 1025.$$

При расчетах же по z_p 50 мы имеем

$$B = 12100$$

$$E = 1140.$$

а во время опытной поездки № 36

$$B = 13100$$

$$E = 1235.$$

А так как кривая

$$u = f(s),$$

по которой мы делали сейчас расчет, построена применительно той программы управления паровозом, которой машинист фактически держался во время поездки № 36, то можно считать, что величина

$$100 \frac{1235 - 1025}{1025} = 20,5 \%$$

характеризует влияние на расход нефти того пропуска через золотник, который имел место во время этой поездки (см. стр. 193).

Пример 20. Как отразится на времени хода товарного поезда весом 870 тонн при паровозе 0—4—0 О¹³ повышение на участке Бологое II — Осташков предельной скорости с 30 до 50 km/h, при условии сохранения того же расхода нефти?

Придерживаясь абсолютно наивыгоднейших комбинаций и стремясь к тому, чтобы в обоих случаях расход нефти был одинаков, строим по методу Липеца кривые

$$V = \psi(s)$$

$$t = \chi(s)$$

и по способу, указанному в этом §, кривую

$$u = f(s).$$

Затем, по этой последней кривой находим B , а по нему, с помощью фиг. 18 (стр. 39 и 259) и расход нефти E . Значения этих величин приведены в таблице XXXVIII, где также даны и средние из результатов пяти опытных поездок, во время которых точно выполнялась программа управления паровозом, принятая при расчете.

Таблица XXXVIII.

	Расчетные			Средние из поездок			Разница в %	
	$V_m = 30$	$V_m = 50$	Разница %	$V_m = 30$	$V_m = 50$	Разница %	$V_m = 30$	$V_m = 50$
t	312	264	- 15,4	313	268	- 14,3	- 0,3	- 1,7
B	15730	15860	+ 0,8	15170	15780	+ 4,0	+ 3,8	+ 0,5
E	1290	1295	0	1297	1285	- 1,0	- 0,5	+ 0,8

Из этой таблицы мы видим, что время хода, благодаря повышению предельной скорости, без затраты топлива может быть на нашем участке уменьшено благодаря его «перевалистому» профилю на 15%. Это, конечно, выгодно, но только в том случае, если мы рискуем ездить с такими скоростями по коротким уклонам без увеличения числа тормазильщиков.

В данный момент, однако, заслуживает внимания не столько ответ на поставленный нами вопрос, сколько факт почти полного совпадения расчетных и опытных данных. Последнее особенно важно потому, что опытные поездки, о которых сейчас идет речь производились в 1913 г. с паровозом О^В выстроенным на Невском заводе в 1905 г., а опыты I цикла, по которым построен «паспорт», производились в 1908 г. над паровозом, выстроенным в 1903 на Брянском заводе.

Такая сходимость, однако, характерна только для расчетов по отсечкам и притом в применении к сравнительно исправным паровозам. Как мы видели выше (см. стр. 197 и 278), при переходе к расчетам по z мы, вследствие игнорирования искусства машиниста, уже заметно увеличиваем расход пара и топлива, при обыкновенном же способе расчета эта расходимость еще более увеличивается в силу увеличения T , т. е. в силу неверности предположения Липца о природе поправок τ (см. стр. 237). Наконец, при неисправных паровозах расходы увеличиваются еще вследствие неизбежных при этом потерь, которые не поддаются никакому учету, кроме непосредственного измерения.

§ 74. **Определение расхода пара, воды и топлива паровозами, для которых нет опытных данных.** В этом случае, как и для получения силы тяги, надежнее всего распространить на паровоз, о котором идет речь, опытные данные, полученные для паровоза подходящего типа. При этом для получения кривых u , как уже было указано на стр. 36, можно пользоваться одним из двух предположений: или что у обоих паровозов для любой комбинации одинакова зависимость

$$\beta = \frac{u}{a^2 l \delta_k} = \varphi(n),$$

где n число оборотов в секунду, или что у них одинакова зависимость

$$\frac{U}{N_k} = \psi(Q, \varepsilon, V).$$

Что же касается построения по одному паровозу для другого зависимости

$$z = \phi(y)$$

для определенного топлива, то его всего удобнее вести, исходя из предположения, что у обоих паровозов одинакова зависимость между y и коэффициентом полезного действия котла

$$\eta_k \cong \frac{zHL}{yGK},$$

где L число калорий в 1 kg пара, а K теплотворная способность топлива.

Если же почему-либо такой перенос опытных данных с одного паровоза на другой представляется неудобным, или, если расход воды и топлива требуется определить лишь приблизительно, то для этой цели можно воспользоваться найденными

из опыта над подходящими типами паровозов средними значениями расхода пара на паровую лошадь в час и средними значениями испарительной способности данного топлива, т. е. средними значениями U/N_k или U/N_i и U/C . В самом деле, имея эти величины и работу, исполненную паровозом на данном участке $T \cdot 10^6 \text{ kg. m}$, мы получаем

[illegible]

[illegible]

где 0,27 есть переводный коэффициент от миллионов kg. м. к паровым лошадям в час⁴).

Так как расчеты этого [рода очень грубы, то и для определения работы, исполняемой паровозом на данном участке, нет надобности прибегать к точным формулам сопротивления. Это обстоятельство позволяет мне в данном случае, и только в нем, рекомендовать и для пассажирских поездов формулу

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}$$

тем более, что только при линейных формулах среднее значение функции соответствует среднему значению независимой переменной. Поэтому, пользуясь этой формулой для определения среднего w_0 , в нее достаточно подставить значение средней скорости.

Работу паровоза между двумя пунктами, где скорость поезда одинакова, можно представить себе состоящей из двух частей: работы, пошедшей на преодоление сопротивления на площадке и на преодоление силы тяжести. Влиянием же кривых при столь грубых расчетах можно пренебрегать. Называя через s длину всего нашего участка, а через

$$w_e = 1,5 + \frac{V_e}{20}$$

среднее удельное сопротивление на площадке, для работы на преодоление этого сопротивления имеем формулу

$$T'_k = w_c \, s \, (P \perp Q);$$

¹⁾ Паровая лошадь есть мощность равная 75 килограммометров в секунду. Паровая же лошадь в час есть работа, равная

$$60 \cdot 60 \cdot 75 = 270\,000 \text{ kg. m.} = 0,27 \cdot 10^6 \text{ kg. m.}$$

а для работы силы тяжести

$$T_k'' = 1000 (P + Q) h,$$

где h возвышение конечной точки пути над начальной в метрах. Таким образом полная работа

$$T_k = (P + Q) \left[\left(1,5 + \frac{V_c}{20} \right) s + 1000 h \right] \dots \dots \dots 81$$

Формула эта, однако верна только в том случае, если мы не прибегаем к помощи тормазов; в противном случае к T_k надо еще прибавить работу тормазов

$$T_b = B s_b = 1000 \varphi_c \vartheta (P + Q) s_b,$$

где s_b путь, пройденный на тормазгах, а φ_c среднее значение φ_k , которое в таких грубых расчетах можно принять равным 0,15. Если же, кроме того, считать $\vartheta \approx 0,1$, то

$$T_b \approx 15 s_b (P + Q),$$

и

$$T_k = (P + Q) \left[\left(1,5 + \frac{V_c}{20} \right) s + 1000 h + 15 s_b \right] \dots \dots \dots 81a$$

Что же касается численных значений величин U/N_k и U/C , то для первой можно пользоваться таблицей XXXIX, а для второй значениями

$$\frac{U}{C} = 6-7$$

для угля и

$$\frac{U}{C} = 11$$

для нефти.

Таблица XXXIX. Средние значения. U/N_k ($L = 637$)¹⁾.

Расширение	Пар	Пассажирские	Товарные
Одиночное	Насыщенный	12—14	14—16
„	Перегретый	9—11	11—13
Компаунд	Насыщенный	12—14	12—14
„	Перегретый	8—10	8—10

¹⁾ Иными словами, эта таблица дает расход в „нормальном“ паре, что только и позволяет пользоваться ею для паровозов с перегревом.

Пример 19. Пользуясь опытными данными для паровоза 0-4-0 О^в, найти зависимость

$$z = \phi(y)$$

для паровоза 1-4-0 Ш при отоплении его Прохоровским углем.

В таблице XL выписаны из фиг. 18 значения z для паровоза О^в, соответствующие $y = 100, 200$ и т. д.; там же для $L = 669$ и $K = 7100$ подсчитаны значения

$$\eta_k = \frac{zHL}{yGK}$$

Принимая, что у паровоза Ш η_k будет иметь те же значения, и зная, что у него

$$\rho_k = 14$$

$$L = 670$$

$$G = 2,8$$

$$H = 206,$$

по формуле

$$z = \frac{\eta_k y G K}{H L}$$

находим значения z , показанные в таблице XL. Там же приведены и z , полученные из опыта над паровозом Ш. Сходимость

Таблица XL.

	y	100	200	300	400	500
О ^в	z	95	18,1	25,2	29,6	32,1
О ^в , Ш	η_k	0,74	0,70	0,65	0,57	0,50
Ш	z	10,6	20,2	28,1	33,0	35,8
„	Опытное z	10,4	20,8	27,5	30,2	30,0
„	Разница %	- 2	- 3	+ 2	- 9	+ 19

между ними, кроме $y = 500$, вполне удовлетворительная.

Пример 15. Определить грубо расход пара и топлива паровозом Н^в при обслуживании скорого поезда везом 460 тонн на участке Серпухов—Тула, согласно заданиям, изложенным на стр. 190.

На стр. 215 мы нашли, что время хода нашего поезда равно 124' или средняя скорость $V_c = 51,9 \text{ km/h}$, откуда

$$w_c = 1,5 \div \frac{V_c}{20} = 4,1$$

$$T'_k = sw_c (P + Q) = 217 \cdot 10^6 \text{ kg. m.}$$

Отметка Серпухова 71,65 саж., а Тулы 70,42 саж., поэтому

$$h = -1,13 [\text{саж.}] = -2,4 [\text{m}].$$

Далее на стр. 270 мы видели, что без пара предельная скорость нашим поездом достигается только при

$$i_k < -10,5$$

Поэтому тормажение на этом участке должно иметь место лишь при подходах к станциям и предупреждениям. Считая для первых $s_e = 400^{\text{м}}$, а для вторых, принимая во внимание что они оба следуют за уклонами, $s_k = 800^{\text{м}}$, имеем общее

$$s_b = 6.400 \div 2 \cdot 800 + 1000 = 5000,$$

где последние 1000^м введены на остановку в Лаптеве. При таких условиях

$$T_b = 15 s_b (P + Q) = 42 \cdot 10^6 \text{ kg. m}$$

и

$$T_k = T'_k + (P + Q) h + T_b = 258 \cdot 10^6 \text{ kg. m.}$$

Из осторожности для U/N_k берем, наибольшее значение соответственной графы таблицы XXXIX, а именно

$$\frac{U}{N_k} = 14;$$

тогда

$$B = \frac{U}{N_k} \frac{T_k}{0,27} = 13400$$

и

$$E = \frac{B}{11} = 1220.$$

Опытная же поездка дала

$$B = 13100,$$

$$E = 1235,$$

что только на $1\frac{1}{2} - 2\%$ меньше исчисленного нами столь грубым образом. Столь близкая сходимость объясняется, конечно, случайностью, по существу же этот способ не может претендовать на точность большую $\pm 20\%$.

Расчеты составов.

При установившейся скорости

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

$$F = (w_0 + i_k) (P \mp Q);$$
[illegible]
$$w_0 = \frac{(w'_0 + w_m) P + w''_0 Q}{P + Q}$$
$$Q = \frac{F_i - (w'_0 + w_m + i_k)P}{w''_n + i_k} ; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$

а если с касательной, то

$$w_0 = \frac{w'_0 P - w''_0 Q}{P - Q}$$

и

$$Q = \frac{F_k - (w'_0 + i_k) P}{w'_0 + i_k} \dots \dots \dots 82 \text{ к}$$

Пользуясь всеми этими формулами, надо помнить, что оба F и все w суть функции скорости, и потому, задаваясь на расчетном под'еме некоторой равномерной скоростью V , мы должны ввести ее и в F и в w .

Пример 21. Определить состав пассажирского поезда, который паровоз 1-3-1 С при $z = 40$ может везти на Веребинский под'ем $i_k = 6,3$ (длиной 20 верст) с установившейся скоростью $V = 50 \text{ km/h}$.

Удельное сопротивление 1-3-1 С как повозки при $V = 50$, согласно фиг. 30,

$$w'_0 = 2,9.$$

Сопротивление вагонов берем по формуле автора (см. стр. 76)

$$w''_0 = 1,5 + 0,2 V \cdot \frac{V + 100}{1000},$$

что для $V = 50$ дает

$$w''_0 = 3,0.$$

Силу тяги для $z = 40$ берем из «паспорта»; она имеет вид, показанный на фиг. 124, согласно которой при $V = 50$

$$F_k = 5000.$$

Вес паровоза С с тендером равен 125 тонн. Таким образом в нашем случае

$$(w'_0 + i_k) P = (2,9 + 6,3) 125 = 1150$$

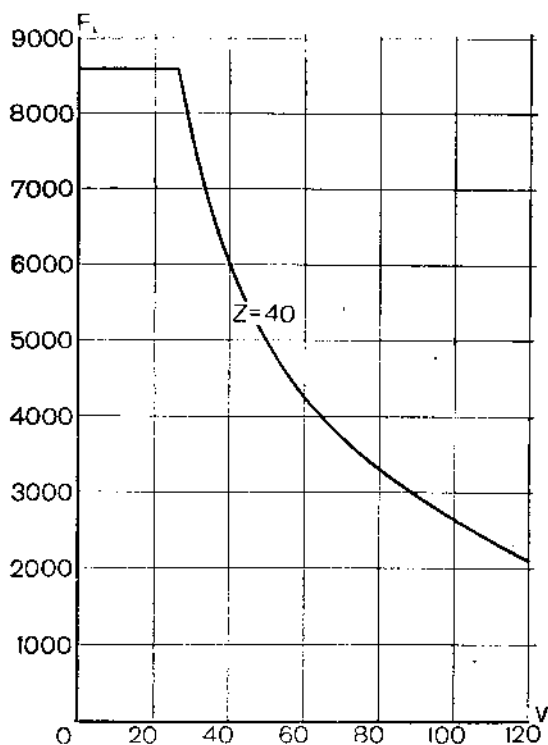
$$w''_0 + i_k = 3,0 + 6,3 = 9,3$$

$$Q = \frac{3850}{9,3} = 414 \text{ [т]}.$$

Нельзя не отметить, что в данном примере

$$w' \approx w''_0 \approx 3;$$

поэтому расчет можно было вести по формуле



Фиг. 124. 1—3—1. С.

$$Q = \frac{F}{w_0 + i_k} - P,$$

что дает

$$Q = \frac{5000}{9,3} - 125 = 413.$$

Пример 22. Определить состав пассажирского поезда, который паровоз 1—3—0 Н^у может вести при вполне открытом регуляторе и впуске 0,6 в малый цилиндр на подъем 10‰, совпадающий с кривыми радиуса 350 саж. с установившейся скоростью 30 км/ч.

Беря удельное сопротивление паровоза Н^у из фиг. 30 (стр. 82) для $V = 30$ равным 2,0 кг/т, силу тяги из «паспорта» для 1—0,6—30 равной 4800 кг, а для вагонов применяя формулу автора, имеем

$$m'_0 = 2$$

$$w''_0 = 2,3$$

$$i_k = 10 + \frac{350}{R} = 11$$

$$w'_0 + i_k = 13$$

$$w''_0 + i_k = 13,3$$

$$F_k = 4800$$

$$Q = \frac{3500}{13,3} = 265.$$

Пример 23. Определить состав товарного поезда, который на $i_k = 8,5$ может везти паровоз 0—4—0 нормального типа при $z = 25$ со скоростью, соответствующей одному обороту колес в секунду, как то требовалось циркуляром б. Управления Каз. ж. д. от 11 августа 1890 г. за № 19243, и как то отстаивается некоторыми специалистами.

При $z = 25$ скорости

$$V = 3,6 \pi D = 13,6 \frac{\text{km}}{\text{h}},$$

соответствующей 1 обороту по эюре, приведенной на фиг. 9

$$F_k = 7500,$$

а w_0 по формуле Балдвина

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20} = 2,2,$$

откуда при $P = 100 \text{ t}$

$$Q = \frac{7500}{10,7} - 100 = 600 \text{ t}$$

или 37 тысяч пудов.

§ 76. Выбор установившейся скорости при расчете состава. В предыдущем § остался невыясненным вопрос, какой же скоростью на расчетном подъеме надо задаваться при определении состава. Между тем вопрос этот заслуживает особого внимания, ибо в зависимости от того или иного решения его при равных прочих условиях величина состава будет колебаться в очень широких пределах.

В пассажирской службе задается обычно не эта скорость, а средняя коммерческая, т. е. число часов хода и стоянок между конечными пунктами. Вычитая из этого времени время нужное для коммерческих и технических стоянок, получаем полное

время хода T_0 . Затем задаются рядом составов

$$Q_1 = qn_1$$

$$Q_2 = qn_2$$

.....

где n суть целые числа, и для них находят полные времена хода

$$T_1, T_2, \dots$$

То Q , которое дает T ближайшее к T_0 , и есть искомое. Иногда ищут T ближайшее не к T_0 , а к

$$T_0 + T''.$$

где T'' есть некоторый запас на нагон опозданий.

В последнее, впрочем, время с развитием прямых беспересадочных сообщений состав пассажирских поездов и особенно курьерских все чаще и чаще у нас стал задаваться соображениями договорного характера, т. е. необходимостью иметь в поезде определенное число вагонов данного сообщения. В этом случае тяговые расчеты сводятся к тому, чтобы по заданному Q подсчитать время хода, а иногда и подобрать подходящий тип паровоза.

В тех же редких случаях, когда выбор скорости пассажирских поездов на расчетном под'еме ничем не стеснен, его задаются обычно между 20 и 50 вер./час. в зависимости от пропускной способности и назначения данного поезда.

Напротив, в товарной службе, где время хода не ограничено никакими соображениями, кроме коммерческих, выбор скорости на расчетном под'еме, находится в руках дороги. Очевидно, что чем большей скоростью мы зададимся, тем меньший получится состав. Таким образом, выбор скорости на расчетном под'еме в товарной службе сводится к основному вопросу, что выгоднее: возить скоро легкие составы или медленно тяжелые. Вопрос этот, привлекавший внимание многих ученых техников¹⁾ и еще не

¹⁾ Карташев. Составление графиков движения товарных поездов с наиболее выгоднейшей скоростью их в пути. Москва. 1890.

Петров. О наиболее выгоднейшей скорости товарных поездов. СПб. 1892.
Henry. Freight Train Speed on the Northern Pacific R. Railroad Gazette. 1900, № 9.

Rühle von Lilienstern. Geschwindigkeit der Güterzüge. Organ. 1901, № 6.
Gostkowsky. Die günstigste Geschwindigkeit der Güterzüge. Organ. 1902, № 3.

давно возбуждавший горячие споры, ныне может считаться, по крайней мере, для условий русских дорог окончательно решенным и теорией и практикой в пользу больших составов.

Таким образом в товарной службе расчет составов в большинстве случаев сводится к определению наибольшего возможного на данном участке состава. На первый взгляд задача получается неопределенная, ибо при непрерывном возрастании w вместе с V и непрерывном уменьшении F с увеличением скорости наибольший состав получается как будто при бесконечно медленной езде по под'емам, что недопустимо ни по условиям пропускной способности, ни по соображениям безопасности и срочности движения. В действительности, однако, этой неопределенности не существует. Дело в том, что, как было уже указано на стр. 72, w_0 при тех скоростях, которые применяются в товарной службе на под'емах, можно считать постоянным и равным 2; поэтому скорость влияет на состав

$$Q = \frac{F}{w_0 + i_k} - P$$

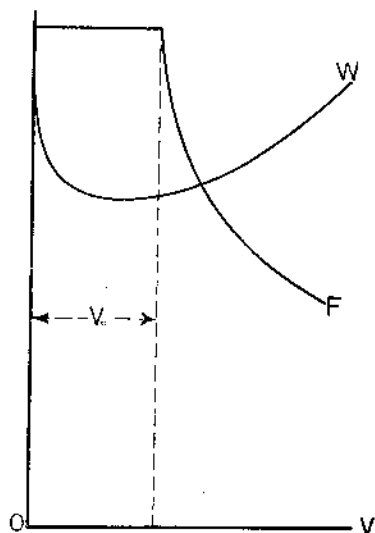
только постольку, поскольку от нее зависит F . Это же влияние начинается, как это ясно из фиг. 125, только с

$$V \geq V_e.$$

При скоростях же

$$V < V_e$$

сила тяги остается постоянной. Поэтому фактически состав растет только при уменьшении скорости до V_e , при дальнейшем же ее уменьшении Q остается постоянным. Иными словами, дальнейшее уменьшение V совершенно бесполезно или вернее вредно, ибо с уменьшением скорости на под'емах растут затруднения в смысле пропускной способности, опасности остановок в пути и разрывов при попытках затем взять поезд с места.



Фиг. 125.

Ihan. Die günstigste Geschwindigkeit der Güterzüge. Organ. 1902, № 11.
Ломоносов. Наивыгоднейший состав товарных поездов. Инженер. 1904, № 2.

Щелковитов. К вопросу о наивыгоднейших составах товарных поездов. 1910.
Ломоносов. Научные проблемы эксплуатации железных дорог. 1914.

Вот почему при определении наибольшего состава мы должны задаваться скоростью V_e , т. е. той наибольшей скоростью, при которой еще возможно использовать всю силу тяги по сцеплению. При больших скоростях мы теряем в составе, при меньших ничего не выигрывая, уменьшаем пропускную способность и увеличиваем вероятность остановки в пути.

На загруженных участках бывают, однако, такие положения, когда необходимость пропустить через них определенное количество груза отодвигает на задний план вопрос о том, чтобы эту перевозку совершать наиболее дешевым способом. Иными словами иногда по условиям пропускной способности при расчетах составов приходится брать

$$V > V_e$$

Пример 24. Определить наибольший состав поезда, который паровоз 0—4—0 нормального типа может везти на под'еме $i_k = 8,5$, при собственном весе с тендером 100 тонн.

Из опытных данных, приведенных на фиг. 19 (стр. 28) берем

$$\text{Max } F_k = 8700 \text{ kg},$$

а удельное сопротивление поезда сообразно сказанному на стр. 290

$$w_0 = 2,0.$$

Если же воспользоваться формулой Балдвина

$$w_0 = 1,5 + \frac{V}{20}$$

и вместо V взять по фиг. 9 для $\varepsilon = 25$

$$V_e = 9,5,$$

то

$$w_0 = 1,98 \approx 2,0.$$

Сообразно этому

$$Q = \frac{\text{max } F}{w_0 + i_k} - P = \frac{8700}{10,5} - 100 = 720 \text{ [t]}$$

или 43 тысячи пудов.

Цыфра 8700 kg соответствует коэффициенту сцепления

$$\psi_k = \frac{8700}{51006} = \frac{1}{5,8}.$$

что достигается в хорошую погоду без песка; если же по примеру Америки на под'емах систематически ездить с песком, то φ_k можно поднять до $\frac{1}{5}$. Это даст

$$\text{Max } F_k = \frac{51000}{5} = 10200 \text{ [kg]}$$

и

$$Q = \frac{10200}{10,5} - 100 = 850 \text{ [t]}$$

или 52 тысячи пудов, т. е. на 18% больше. Как показывает фиг. 15, достичь таких значений силы тяги у паровоза нормального типа можно только при впусках больших 0,7, т. е. при действии крана Линднера, что по экономическим соображениям недопустимо.

Кроме того надо иметь в виду, что как ни заманчиво на первый взгляд увеличивать составы за счет песка, усиленное его применение имеет и отрицательные стороны. Во-первых, при нем заметно ускоряется износ паровозных шин, а во вторых песок не только увеличивает сцепление ведущих колес паровоза, но и сопротивление всего поезда. Это увеличение, как показали специальные опыты на дороге Чикаго-Берлингтон в С. - Америке, выражается цифрой в 7,5%¹⁾.

Небезынтересно отметить, что состав

$$Q = 720 \text{ [t]}$$

определенный при вполне нормальных условиях работы паровоза на 20% больше, чем состав определенный нами на стр. 288, исходя из требования одного оборота в секунду, что еще недавно было обязательно для русских дорог.

Пример 25. Определить величину виртуального под'ема i_k , на котором два паровоза нормального типа, один в голове и один в хвосте, могут вывезти состав, являющийся предельным для $i_k = 8,5$ при одиночной тяге.

На стр. 49 было указано, что при подталкивании силу тяги обоих паровозов благоразумнее брать равной 1,7—1,8 силы тяги одного паровоза. Остановиваясь на цифре 1,75, мы имеем уравнение установившегося движения на искомом под'еме под видом

$$1,75 F_k = (w_0 + i_k) (2P + Q);$$

¹⁾ The Engineer. 1900. № 26/1.

а так как при

$$V = V_*$$

$$F_k = 8700$$

$$w_0 = 2$$

$$P = 100$$

$$Q = 720,$$

то

$$i_k = \frac{1,75 F_k}{2P + Q} - w_0 = 14,5$$

§ 77. Влияние на состав поезда нагрузки вагонов. В § 27 мы установили, что удельное сопротивление товарных вагонов находится в явной зависимости от их нагрузки, именно мы нашли, что

$$w_0'' = a + \frac{b}{q},$$

где q есть средняя нагрузка вагона, а a и b —некоторые функции скорости. Поэтому теоретически представляется бесспорным, что

$$Q = \frac{F_k - (w_0' + i_k) P}{w_0'' + i_k}$$

должно зависеть от q , или иными словами, что вес поезда нужно менять в зависимости от числа в нем осей. С другой стороны на стр. 70--71 мы видели, что влияние q на w_0'' растет вместе со скоростью, и при тех скоростях, с которыми товарные поезда наибольшего веса движутся по расчетным под'емам, это влияние очень невелико. Поэтому естественно возникает вопрос, стоит ли осложнять расчеты наибольших составов, расчеты довольно грубые по существу, учетом влияния q на w_0'' .

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, прежде всего надо выяснить, как влияет при $V \approx 10q$ на w_0'' . С этой целью на фиг. 126 приведены значения w_0'' по разным формулам в функции q . Из этой фигуры мы видим, что при изменении нагрузки русского нормального вагона от нуля до 1000 пудов, удельное его сопротивление меняется по формуле Петрова на 35%, по формуле Х.Н. ж. д.—на 15% и по формуле Франка—на 1%. В § 27 было выяснено, что наиболее надежной является формула Х.Н. ж. д., так как влияние q в формуле Петрова заведомо переоценено. Поэтому можно считать, что, пренебрегая

погоду и на большее число осей в поезде безусловно необходимо. Этот запас и имеется в формуле 83 в виде $w_0 = 2$.

§ 78. Преодоление под'емов за счет разгона. На стр. 285 было уже отмечено, что в действительности равномерное движение устанавливается только на затяжных под'емах. Поэтому изложенный выше способ расчета применим лишь к подобным под'емам; на коротких же под'емах можно вывозить составы

$$Q > \frac{\psi_k P_k}{w_0 + i_k} \dots P$$

за счет живой силы поезда.

Для того, чтобы отдать себе отчет, может ли поезд заданного состава проскочить с разгона данный под'ем или он остановится на нем, мы должны построить на нем диаграмму скоростей и посмотреть, как велика будет скорость, с которой поезд сходит с данного под'ема. Если она будет более 5—7 вер./час., то на поставленный вопрос можно ответить утвердительно; если 3—4, то пускать такой состав уже рискованно, ибо при такой скорости даже незначительное боксование неминуемо вызовет остановку.

Для построения кривой

$$V = \varphi(t)$$

по методу Дедуи, строим, как показано на фиг. 127, кривую

$$f_k = w_0$$

и затем проводим прямую i_k . В данном случае она расположится выше кривой $(f_k - w_0)$. Разность ординат

$$i_k - (f_k - w_0) = (f_k - w_0 - i_k)$$

даст нам величину

$$\frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt},$$

и потому, применяя второй прием (§ 47), и проводя прямые, перпендикулярные лучам 1, 2, 3, ..., мы получим кривую

$$V = \varphi(t).$$

Фиг. 127.

Задаваясь, затем, скоростью вступления на под'ем V_0 и под'

бирая заштрихованную площадь так, чтобы ее площадь равнялась длине под'ема s , мы найдем скорость V , с которой поезд оставляет под'ем.

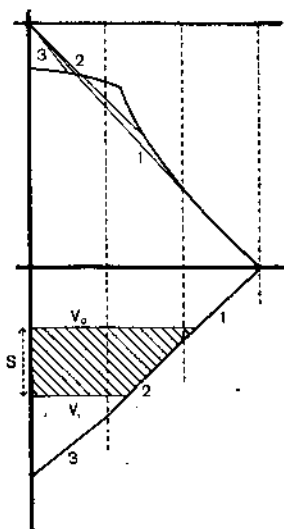
Еще проще эта задача решается по способу Липеца (см. фиг. 129); там длину s надо только отложить по оси пути.

Из фигур 127 — 128 ясно видно, что решение вопроса о возможности или невозможности преодолеть под'ем

$$i_k > \frac{\psi_k P_k}{P + Q_1} - w_0$$

за счет живой силы поезда зависит не только от крутизны и длины этого под'ема, но и от скорости V_0 , с которой поезд вступает на данный под'ем. И очень часто практическое решение данного вопроса сводится не к определению V_1 , а к определению V_0 , необходимой для того, чтобы $V_1 = 6 - 8$ (km/h). Такая задача решается на кривой

$$V = \psi(s)$$



Фиг. 128.

проведением 2 прямых: сперва находится на этой кривой место V_1 , затем откладывается s и проводится прямая V_0 .

Чтобы закончить вопрос о разгоне, необходимо отметить, что обычно все преодоление под'ема длится 10 — 15 минут; поэтому при решении подобных задач силу тяги часто можно брать не по котлу, а по наибольшей отсечке, т. е. допускать во время преодоления под'ема некоторое понижение уровня в котле. При этом надо, однако, иметь в виду, что при легко увлекающейся воде реализовать большие впуски практически невозможно.

Пример 26. Может ли паровоз 0 — 4 — 0 нормального типа провести поезд весом 53000 пуд. по участку Торжок — Ржев Новоторжской линии Ник. ж. д. $V_{max} = 50$ km/h?

Наиболее трудный под'ем на этом участке расположен за мостом через р. Холохольню на 81 вер. от Лихославля. Он имеет длину 1484 саж. и крутизну, как показано во второй снизу графе фиг. 129, от 1, 5 до 10, 9‰, при чем наиболее трудной его частью являются первые 715 саж., где

$$i_k = 10,0 - 10,9.$$

Нормальный состав для такого под'ема

$$Q = \frac{8700}{2 + 10} - 100 = 630 \text{ [t]} = 38000 \text{ [пуд.]}$$

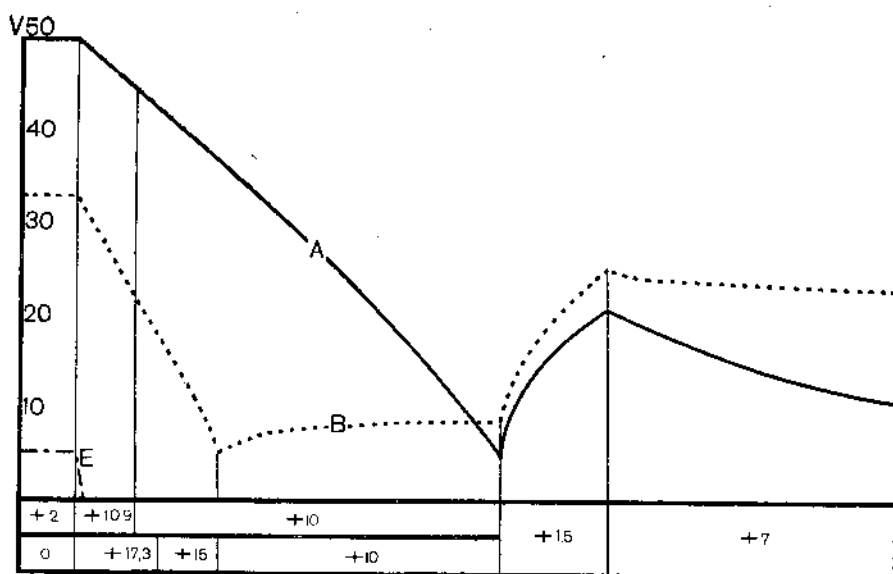
Для того же, чтобы выяснить, может ли этот под'ем быть взят с разгона, строим, как показано на фиг. 129 сплошной линией, кривую

$$V = \psi(s)$$

для наибольшей возможной при кране Линднера комбинации $1 - 0,7$ и $V_0 = 50$ в масштабах

$$1 \text{ [km]} = 37,5 \text{ [mm]}$$

$$1 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] = 12,5 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right].$$



Фиг. 129.

Из нее мы видим, что в конце трудного места скорость падает до 5 (km/h), что лежит как раз на границе допустимого. Таким образом можно сказать, что при сухих рельсах, или, верней, при хорошей песочнице, и при скорости на мосту в $50 \text{ km/h} = 47 \text{ вер./час.}$ данный под'ем может быть взят поездом в 53000 пуд. с разгона.

Пример 27. Можно ли было выдерживать предупреждение об езде по обводному пути при перестройке моста через р. Холмохольню со скоростью $V = 5 \text{ вер./час.}$ с нормальным составом в 38000 пуд.?

Такое положение имело место летом 1911 г., причем верти-

кальный профиль обводного пути, на котором временный мост был расположен на 1 саж. ниже постоянного и на котором были допущены радиусы 150 саж., показан в нижней графе фиг. 129.

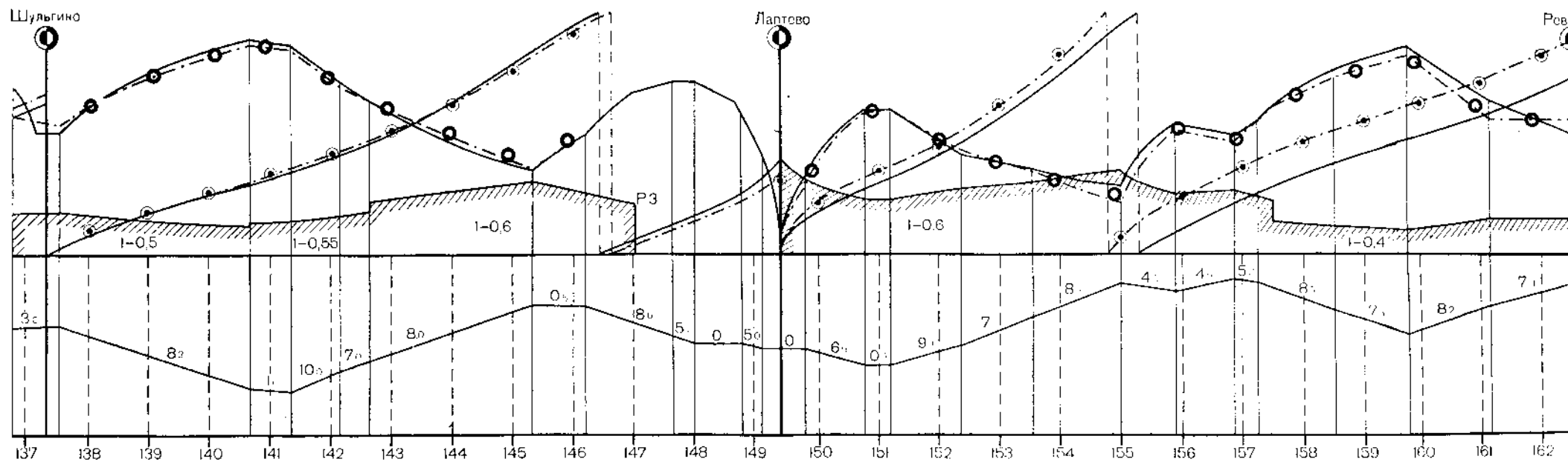
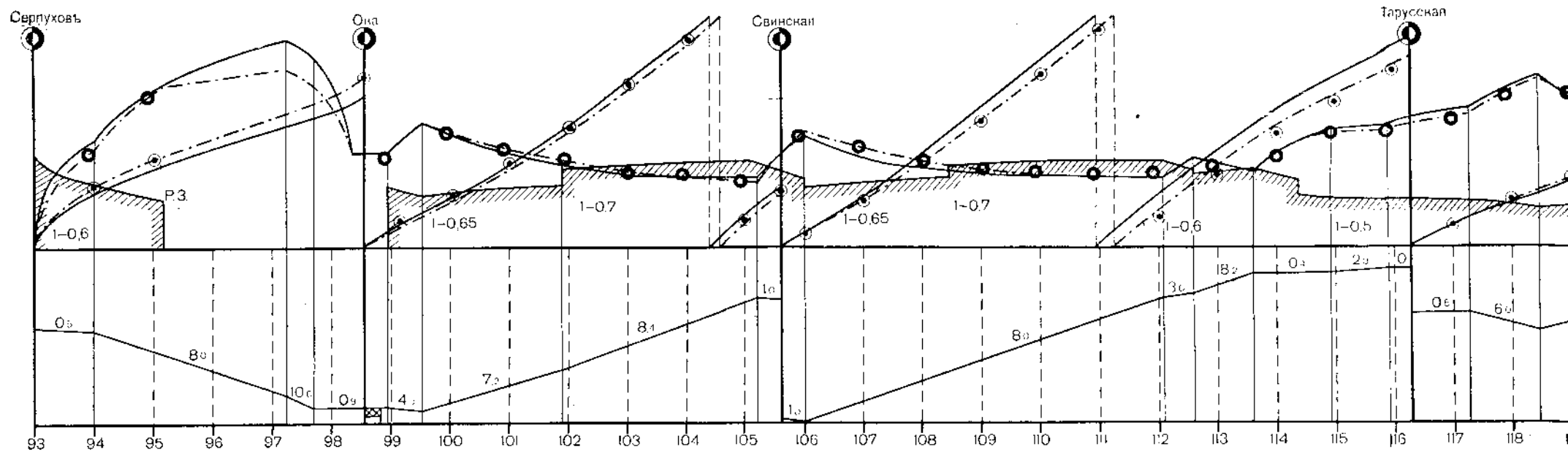
Строим от $V_0 = 5$ пунктиром кривую скорости E . Она падает ниже нуля через несколько сажен, что и имело место в действительности. К машинистам же было пред'явлено требование вывозить нормальный состав во что бы то ни стало.

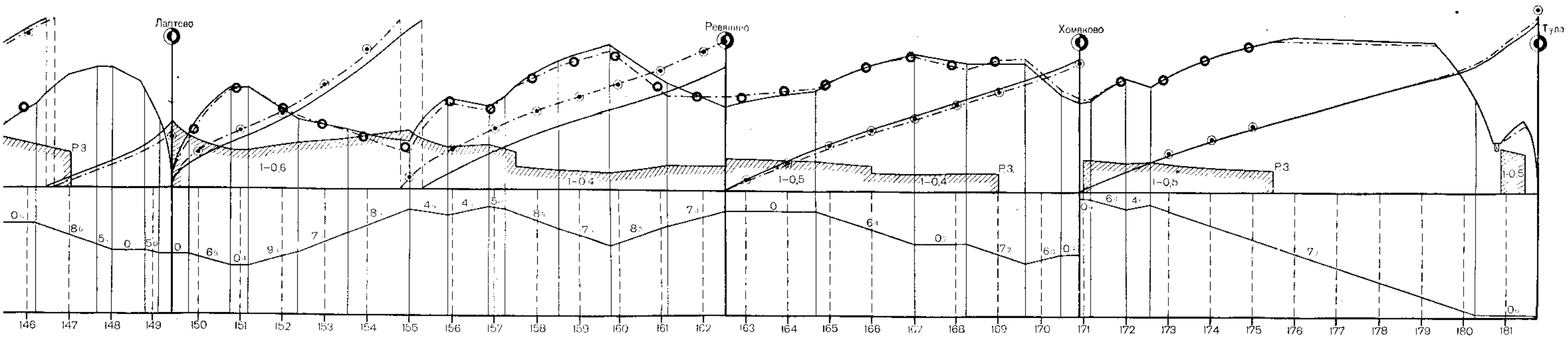
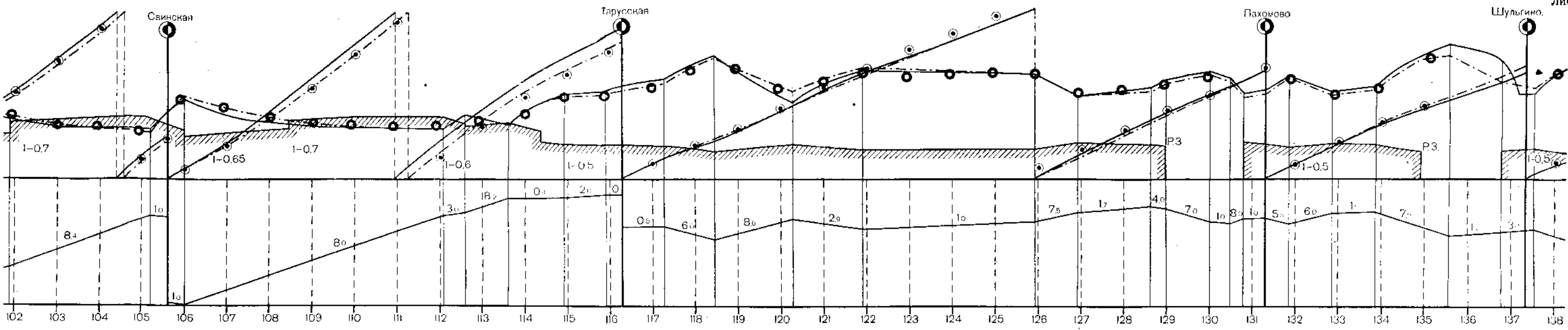
Поэтому пришлось поставить обратный вопрос: насколько они должны были превышать 5 верстную скорость, чтобы исполнить это требование. Задаемся в конце $15\frac{0}{100}$ под'ема скоростью в 5 вер./час. и затем в обе стороны строим пунктиром из одних точек кривую.

$$V = \psi(s).$$

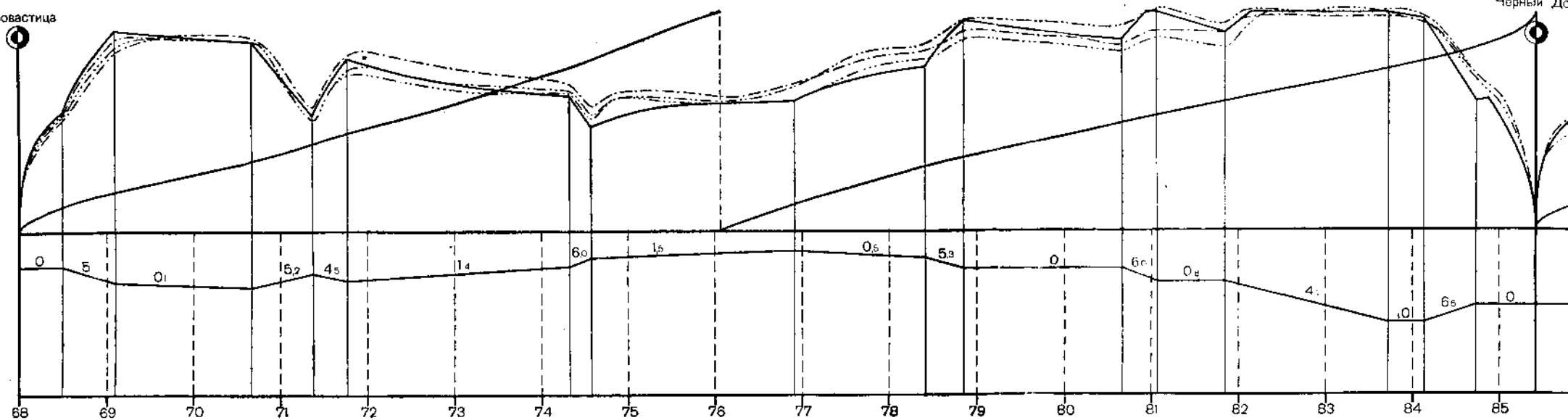
Она показывает, что, для возможности вывезти состав в 38000 пуд. по обводному пути, на временном мосту необходимо было держать вместо 5 вер./час.

$$V_0 = 33 \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \cong 30 \left[\frac{\text{вер.}}{\text{час.}} \right].$$





Горовастица



Черный Д.

Брянцево

