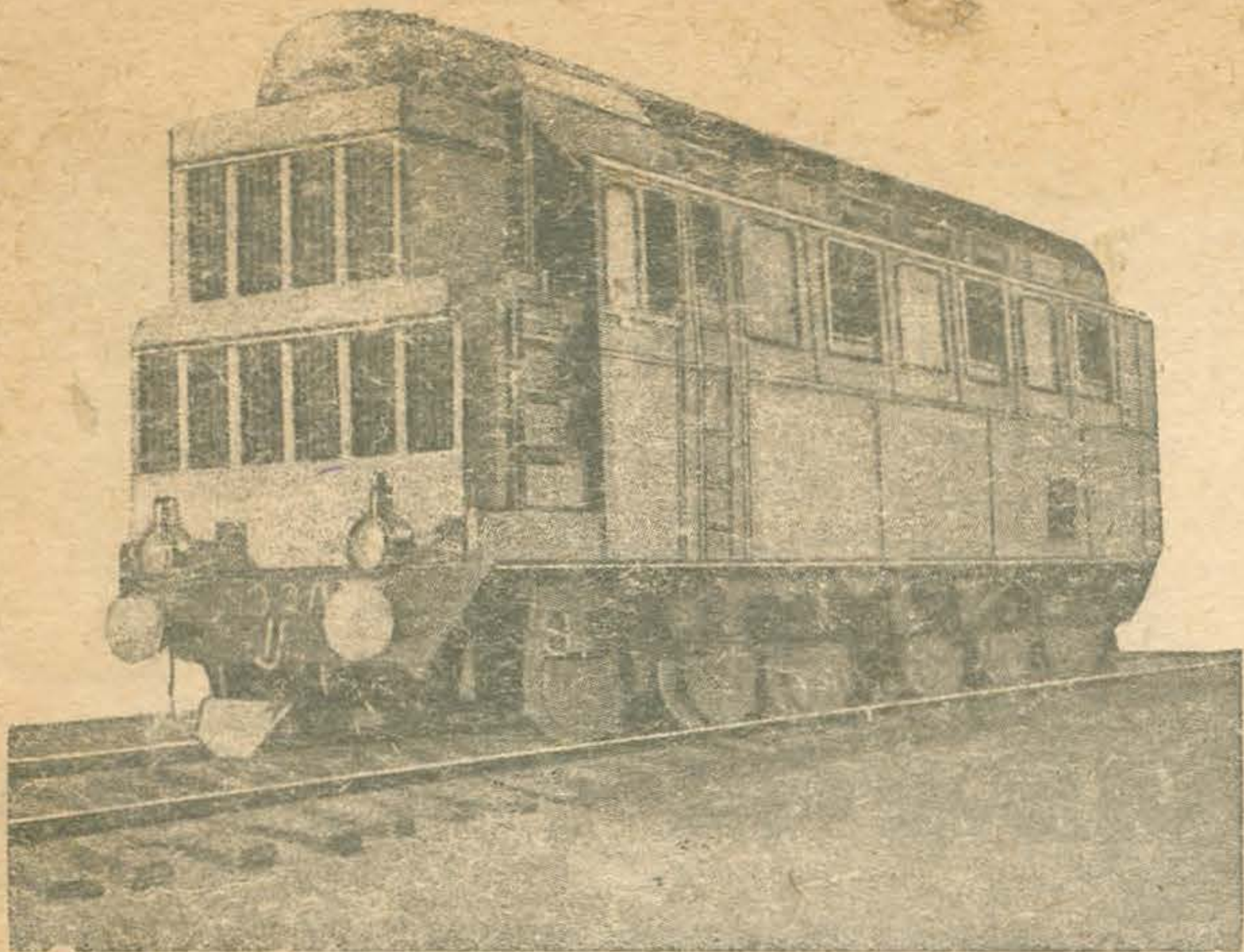


3560

Т/68



проф. К. А. ОППЕНГЕЙМ

621.33

0.62

ТЕОРИЯ

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗНОЙ

ТЯГИ

1 9 3 3

ГОСЖЕЛДОРИЗДАТ НКПС

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

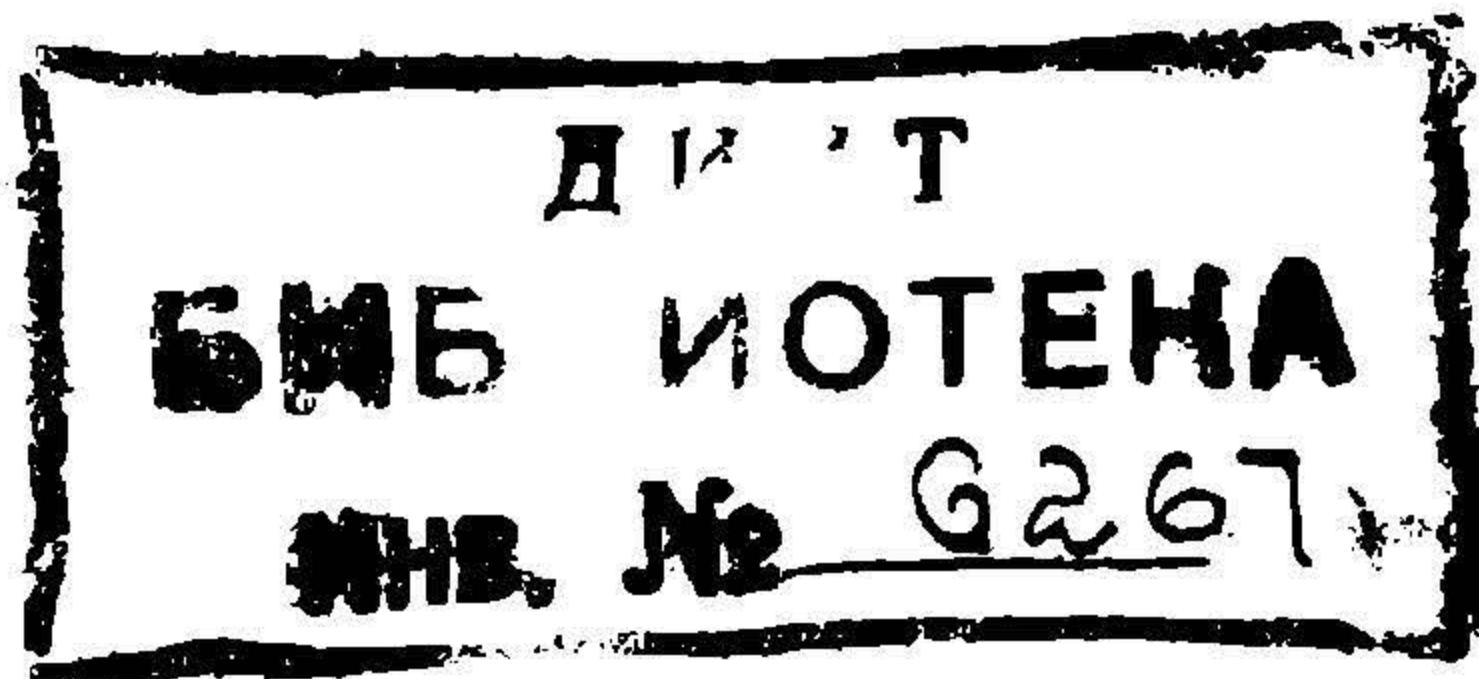
НБ
УДУНТ
(ДШТ)

Проф. К. А. ОППЕНГЕЙМ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГИ

35219

Одобрено Цупкадром НКПС в качестве учеб-
ного пособия для втузов ж.-д. транспорта



1933

ГОСЖЕЛДОРИЗДАТ—НКПС
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

НБ
УДУНТ
(ДШТ)

Настоящий труд дает теорию электротепловозной тяги поездов в систематическом изложении, главным образом, в той части, которая связана с резким различием конструкций самых тепловозов и паровозов (основной генератор энергии и передаточный механизм).

НБ
УДУНТ
(ДШТ)

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время у нас за тепловозной тягой не только признано право гражданства, но ей, в соответствии с июньским и декабрьским пленумами ЦК ВКП (б) и XVII партконференцией, отведена и значительная роль в реконструкции нашего ж.-д. транспорта, дана установка внедрения тепловоза на ряде ж.-д. линий. Во вторую пятилетку тепловозную тягу намечено ввести на значительном протяжении наших существующих ж.-д. линий и вновь строящихся и проектируемых дорог. Между тем до сего времени никем еще систематически подробно не изложена теория тепловозной тяги, что крайне затрудняет изучение ее в целом, а равно изучение ее отличительных от паровозной тяги моментов.

В виду того значения, которое в настоящее время тепловозная тяга приобрела для наших железных дорог, особенно дорог, проходящих по безводным или маловодным районам, по районам с неудовлетворительной для питания паровозов водой, по районам вечной мерзлоты, ныне совершенно немыслимо окончание студентами строительно-путевских вузов без знания проектирования железных дорог под тепловозную тягу.

На ближайший отрезок времени у нас намечены к введению исключительно электротепловозы, т. е. тепловозы с электрической передачей, и, естественно, в первую очередь требуется знание теории электротепловозной тяги поездов.

Настоящий труд и имеет целью изложить теорию названного рода тяги в систематическом виде, причем однако надо заметить, неполную теорию, особой надобности в которой нет, так как целый ряд вопросов при тепловозной тяге поездов вообще разрешается совершенно так же, как и при паровозной тяге¹, а лишь дополнительную теорию, касающуюся исключительно тех вопросов, которые связаны с резким различием конструкций самих тепловозов и паровозов, а именно—с наличием в тепловозах иного основного генератора энергии и передаточного механизма.

Таким образом настоящий труд имеет в виду предварительное знание теории паровозной тяги поездов.

При изложении дополнительной теории электротепловозной тяги мной было обращено особенное внимание на такое изложение ее, при котором было бы возможно усвоение теории при наименьшей затрате времени, и потому наитруднейшие места дополнены примерами, в которых к тому же проведено комплексное построение диаграмм (фиг. 4, 6, 7, 24, 25, 27), что, несомненно, должно значительно облегчить усвоение тех или иных вопросов.

¹ Вопросы сопротивлений движению (за исключением основного удельного сопротивления тепловозов), вопросы тормозных сил, торможения, определения скорости движения и времени хода поезда.

Учитывая то, что излагаемая теория является **дополнительной**, а также то, что в большинстве **строительно-путейских втузов** нашего **Союза** при изучении теории паровозной тяги поездов пользуются. насколько известно, моим трудом „Тяговые расчеты“ (**Проектирование железных дорог**, ч. II, 3-е издание, 1932), мною и при изложении теории электротепловозной тяги приняты, где это было возможно, те же самые буквенные обозначения и в общем сохранена та же принятая мной в названном труде система буквенных обозначений,— система, прекрасно себя оправдавшая за девятилетний период проведения ее в жизнь при прохождении курса „Проектирования железных дорог“ в московском **строительно-путейском втузе**.

В общем настоящий труд может служить пособием не только для студентов **транспортных втузов**, но и для лиц, повышающих свою квалификацию при **посредстве заочного обучения** или **посредством прохождения экстерната**.

Ноябрь 1932 г.

К. Оппенгейм

ТАБЛИЦА ПРИНЯТЫХ БУКВЕННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Обозначение	Значение	Измерение
I. Латинский алфавит		
A	Коэффициент теплоотдачи	ватты/1° Ц
a	Удельный коэффициент теплоотдачи (коэф. т-дачи на 1 м ²)	то же
B	Полный расход топлива тепловозом ($=B_d + B_{дон.}$)	кг
B_d	Расход топлива дизелем (главным двигателем)	
$B_{d/км}$	То же по километровой расходу топлива	
$B_{d/ч}$	То же минутный расход топлива	
$B_{d/ч}$	То же часовой расход топлива	
$B_{дон.}$	Дополнительный расход топлива тепловозом	
$B_{ч}$	Полный часовой расход топлива тепловозом	
C	Полная теплоемкость тела	ватты/ск
c	Удельная теплоемкость тела (теплоемкость 1 кг тела)	1° Ц
D	Диаметр движущих колес тепловоза	м
d	Диаметр цилиндров дизеля	см
e	Основание натуральных логарифмов ($=2,718$)	отвл.
E	Напряжение генератора, мотора	вольт.
$E_{10}, E_{20}...$	Напряжение при скоростях движения тепловоза 10, 20... км/ч.	
f_0	Коэффициент трения между колесами тепловоза и рельсами при скорости, равной нулю	отвл.
g	Ускорение силы тяжести	м/сек ²
H	Полная поверхность нагревания или охлаждения тела	м ²
I	Полярный момент инерции полуската по отношению к его оси вращения	кг/см ²
$I_{я}$	То же якоря электромотора	
I	Некоторая определенная сила тока	ампер
I_2	Сила тока в динамомашине (генераторе тока)	
$I_{т.л.}$	Сила тока в тяговых моторах	
$I_{т.л.}^{дл.}, I_{дл.}$	Сила длительного тока в тяговых моторах	
$I_{т.л.}^{ч.}, I_{ч.}$	Сила часового тока в тяговых моторах	
I_2	Сила эквивалентного тока	
i_p	Руководящий подъем	‰
$i_{ф.}$	Фиктивный уклон	‰
$i_{п.бв.}^{п.}$	Предельный безвредный уклон при паровозной тяге	‰
$i_{п.бв.}^{эл.}$	То же при электротепловозной тяге	‰
K	Теплотворная способность топлива	калории
k	Коэффициент запаса для эквивалентного тока в тяговых моторах	отвлеч.
L	Часовой расход воздуха	кг
l	Ход поршня в цилиндрах дизеля	м
$M_{вр.}$	Вращающаяся масса поезда	
$M_{вр.}^в$	То же вагонов	
$M_{вр.}^{эл.}$	То же электротепловоза	
M_0	Поступательная масса поезда ($= \frac{Q}{g}$)	кг · сек ² /м
$M_0^в$	То же вагонов ($= \frac{P_v}{g}$)	

КБ
УДУНТ
(ДНТ)
5

Обозначение	Значение	Измерение
$M_0^{эм}$	То же электротепловоза $\left(= \frac{P_{эм}}{g} \right)$	} кг см ² /м
M_n	Приведенная масса поезда $[= (1 + \gamma) M_0]$	
$m_{л.р}$	Игра люлевных рессор	мм
$m_{п.р}$	То же подвесных рессор	
$m_{тм}$	Число тяговых моторов у тепловоза	
$m_{ц}$	Число цилиндров у дизеля	
N	Некоторая определенная мощность	л. с.
N_d	Некоторая мощность дизеля	"
N_d^u	Индикаторная мощность дизеля	"
N_d^e	Полезная (эффективная) мощность дизеля (на валу)	"
N_m	Некоторая мощность машины (передаточного механизма)	л. с., киловатт
N_m^a	Полная мощность машины по генератору	то же
$N_m^{e/к}$	Касательная мощность машины по генератору	
n_d	Число оборотов дизеля в секунду	
n_g	Число оборотов динамомашины (генератора тока)	
n_k	Число оборотов колес тепловоза в минуту	
n_m	Число оборотов тяговых моторов в минуту	
P_v	Вес состава вагонов	т
P_m	Полный вес вообще тепловоза	"
$P_{эм}$	Полный вес электротепловоза	
$P_{эм}^c$	Сцепной вес электротепловоза	
$P_{к}^c$	Статическая нагрузка на движущее колесо электротепло- воза	кг
$P_{к}^d$	То же динамическая нагрузка	"
p_u	Индикаторное давление в цилиндрах дизеля	кг/см ²
$p_{\frac{T}{2}}$	Процент в поезде двухосных товарных вагонов	%
$p_{\frac{T}{4}}$	То же четырехосных товарных вагонов	%
Q	Полный вес поезда	т
Q	Количество отдаваемого телом в окружающую среду те- пла	ватты
$q_{\frac{T}{2}}$	Полный вес двухосного товарного вагона	т
$q_{\frac{T}{4}}$	То же четырехосного товарного вагона	"
R	Радиус окружности катания колеса	м
$r_{л.р}$	Жесткость люлевных рессор	кг.мм
$r_{п.р}$	То же подвесных рессор	"
T	Период времени прохода поездом некоторого участка пути из элементов различного профиля	мин.
T_0	Тепловая „Постоянная времени“ тягового мотора	" Ц
t	Некоторая определенная температура воздуха	"
$t_{вх}$	Температура воздуха при входе в холодильник (наружного воздуха)	
$t_{вых}$	То же при выходе из холодильника	
V	Некоторая определенная скорость движения электротепло- воза	км/ч
V_a	Скорость движения электротепловоза по возбуждению	"
W	Часовой расход воды	кг
W	Общее полное сопротивление поезда	"
w	Общее удельное сопротивление поезда	кг/т
	Общее удельное сопротивление вагонов	"

Обозначение	Значение	Измерение
w_o^o	Основное удельное сопротивление вагонов .	кг/т
$w_o^{\frac{m}{2}}$	Основное удельное сопротивление двухосных вагонов .	
$w_o^{\frac{m}{4}}$	Основное удельное сопротивление четырехосных вагонов .	
$w_o^{\frac{с/ср}{o}}$	Среднее (взвешенное) основное удельное сопротивление вагонов в поезде	
$w_o^{эм}$	Общее удельное сопротивление электротепловоза	
$w_o^{\frac{эм}{o/n}}$	Основное удельное сопротивление электротепловоза как повозки .	
$w_o^{\frac{эм}{м/б.т}}$	Основное удельное сопротивление электротепловоза как машины при движении без тока .	
$w_o^{эм}(n+м/б.т)$	Основное удельное сопротивление электротепловоза как повозки и как машины при движении без тока .	
$w_o/б.т$	Основное удельное сопротивление поезда при движении электротепловоза без тока	
$w_o/з.р$	То же при движении паровоза с закрытым регулятором .	
Y	Отдача электротепловоза (полный коэффициент полезного действия электротепловоза в целом)	отвлеч.
Z	Некоторая определенная сила тяги электротепловоза .	кг
$Z^{ил}$	То же индикаторная сила тяги	
$Z^к$	То же касательная сила тяги	
Z^n	То же полезная сила тяги	
Z_d	Некоторая определенная дизельная сила тяги .	
Z_d^p	Дизельная сила тяги по режиму дизеля	
Z_d^x	То же по холодильнику	
Z_m	Некоторая определенная машинная сила тяги	
Z_m^g	Машинная сила тяги по генератору (по возбуждению)	
$Z_m^{т.м}$	То же по тяговым моторам	
$Z_m^{т.м/д.в}$	Длительная машинная сила тяги по тяговым моторам	
$Z_m^{т.м/чс}$	Часовая машинная сила тяги по тяговым моторам	
Z_c	Сцепная сила тяги	
II. Греческий алфавит		
α	Доля веса тяговых моторов, передающаяся лючковым рессорам	отвлеч.
γ	Общий коэффициент инертности всего поезда	
γ^o	Коэффициент инертности (поправки на инерцию вращения) вагонного состава	
γ^n	То же для паровоза	
$\gamma^{эм}$	То же для электротепловоза	
Δ	Тепловой напор в холодильнике (средняя разность температур воды и воздуха в холодильнике)	°Ц
	Условное наполнение дизеля (число делений сектора топливного насоса)	
η_d	Общий коэффициент полезного действия дизеля	отвлеч.
η_e	То же электрической передачи	
$\eta_{в.м}$	То же вспомогательных механизмов	

УДМУНТ
ОДМУНТ

Обозначение	Значение	Измерение
η_a	Коэффициент полезного действия динамомашин (генератора тока)	отвлеч.
η_z	То же зубчатой передачи	
η_m	Механический коэффициент полезного действия дизеля	
η_0	Коэффициент полезного действия дизеля в связи с несовершенством процесса работы	
η_{tm}	Термический коэффициент полезного действия дизеля	
η_{tm}	Коэффициент полезного действия тяговых моторов	
η	Отношение суммы наибольших в течение полного оборота колес касательных усилий на колеса к сумме средних такого же рода усилий	
σ	Действительное наполнение дизеля (форсировка)	°C
τ	Некоторая определенная температура воды в холодильнике	
$\tau_{вх}$	Температура воды при входе в холодильник	
$\tau_{вых}$	То же при выходе из холодильника	
τ	Сверхтемпература обмоток якоря	
$\tau_{я}$	То же конечная сверхтемпература	
$\tau_{н}$	То же начальная сверхтемпература	
$\tau_{н.о.}$	То же начальная сверхтемпература при начале охлаждения	
$\tau_{нагр}$	Сверхтемпература при нагревании	
$\tau_{охл.}$	То же при охлаждении	
φ	Передаточное число передачи к моторам $\left(= \frac{n_k}{n_m} \right)$	отвлеч.
	Коэффициент сцепления между колесами тепловоза и рельсами	
ω	Угловая скорость колес $\left(= \frac{V}{R} \right)$	рад/с
$\omega_{я}$	То же якорей электромоторов $(= \varphi \omega)$	

НБ
УДУНТ
(ДШТ)

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Тепловоз (*die Verbrenningslokomotive, la locomotive du combustion intérieure, the internal combustion locomotive*) представляет собой локомотив, у которого генератором энергии является дизель, т. е. двигатель внутреннего сгорания¹, могущий работать весьма экономично на тяжелых и дешевых сортах жидкого топлива,—на мазуте (нефтяных остатках). В связи с этим за границей тепловоз часто называется дизельным локомотивом (*die Diesellokomotive, la locomotive Diesel, the Diesel locomotive*).

Так как дизели не обладают качеством саморегулирования числа оборотов, а при числе оборотов, близком к нулю, не могут работать вовсе, то для того, чтобы тепловоз мог быть орудием ж.-д. службы, в целях компенсирования недостаточной в смысле регулирования гибкости дизеля в тепловоз между двигателем и осями ведущих колес вводится специальная „передача“, назначение которой состоит в том, чтобы передавать с возможно меньшими потерями энергию от продольного вала дизеля поперечным осям колес и при этом давать возможность плавно изменять силу тяги на ободах от нуля до максимума. Были, и сейчас имеются, попытки построить тепловозы с непосредственной (механической) передачей вращающего момента от вала дизеля к осям тепловоза, но эти попытки пока еще не увенчались должным успехом.

Из применявшихся и ныне применяемых систем передачи надо отметить следующие: гидравлическую, компрессорную и электрическую.

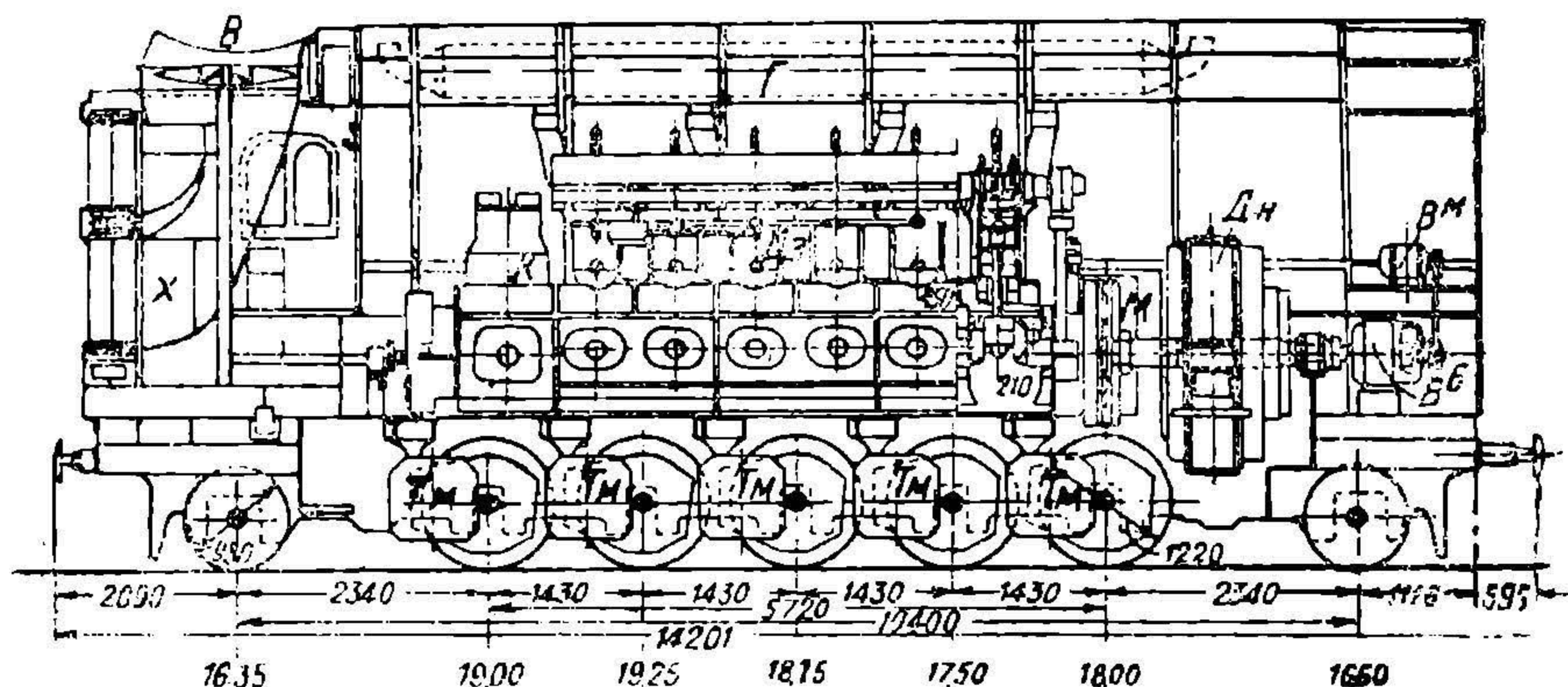
Гидравлическая передача заключается в том, что на вал двигателя насаживается центробежный насос, подающий от генератора жидкость (масло) насаженной на валу передачи турбине, которая и вращает колеса. Детали этого рода передачи, в общем мало удачной, еще не приняли ж.-д. форм. Попытки применить чисто гидравлическую передачу для больших мощностей (примерно свыше 400 л. с.) не увенчались успехом.

Компрессорная передача состоит в том, что энергия от дизеля к колесам тепловоза передается с помощью цилиндров с нормальным кулисным распределением и шатунов паровозного типа, причем в цилиндрах работает тот или иной газ, сжимаемый до начального давления 15—16 ат.

¹ Под „двигателем внутреннего сгорания“ понимается такой тепловой двигатель, который работает газами, получающими высокую температуру и давление от сгорания топлива внутри рабочего цилиндра. Двигатели внутреннего сгорания имеются: а) газовые, работающие на разного рода газах: натуральном, специально приготовленном (светильном, генераторном, водяном, смешанном) или получаемом как побочный продукт металлургических и других производств (колошниковом, газе коксовых печей); б) спиртовые и в) нефтяные, работающие на нефти и ее погонах: бензине, керосине и мазуте. Нефтяные двигатели, могущие работать на мазуте, называются „дизелями“, — по имени их изобретателя *Рудольфа Дизеля* (1897 г.).

при помощи дизелькомпрессора, установленного на рамах тепловоза. При пользовании для такого рода передачи сжатым воздухом имеет место частный случай пневматической передачи энергии, широко применяющийся в разного рода орудиях и машинах. Вопрос о компрессорной передаче в тепловозах,—передаче, оказавшейся до сего времени менее выгодной, чем механическая, и особенно электрическая, пока является не решенным.

Электрическая передача, являющаяся наиболее простой, легкой в управлении, наиболее надежной и в настоящее время наиболее изученной, состоит в том, что вал дизеля соединен с динамомашиной, от которой ток подается тяговым моторам, установленным на осях колес тепловоза (по одному на каждой оси или по два, как это имеет



Фиг. 1.

B — Вентилятор, *B^b* — Возбудитель большой (главный), *B^{*}* — Возбудитель малый (вспомогательный), *T* — Глушитель, *D_з* — Дизель, *D_н* — Динамо-машина, *K* — Компрессор, *M* — Муфта (полужесткая), *T_т* — Тяговый мотор, *X* — Холодильник.

место например в тепловозе Э-Эл-5) и жестко связанным с помощью лапчатых подшипников с колесными парами. На осях тепловоза имеются зубчатки, находящиеся в зацеплении с зубчатками якорей моторов. На фиг. 1 в виде примера представлен в продольном разрезе тепловоз Э-Эл-2 с электрической передачей, в котором имеется шестицилиндровый четырехтактный двигатель.

В данном случае малый возбудитель *B^{*}* возбуждается током небольшой аккумуляторной батареи, затем ток его, связанный посредством ременной передачи с большим возбудителем *B^b*, является возбуждающим током для динамо машины *D_н*. От последней ток идет к пяти тяговым моторам *T_т*. В цепь возбуждения большого возбудителя включен контроллер управления (малых размеров), посредством которого регулируется сила тока названной цепи, и потому возможно изменение силы тока и напряжения динамомашины, следовательно и тяговых моторов. В результате этого возможно изменение скорости и силы тяги тепловоза.

Компрессор *K* служит для зарядки воздухом пусковых баллонов и для пульверизации топлива, поступающего через форсунки в цилиндры дизеля.

§ 2. Тепловоз с электрической передачей представляет собой не что иное, как дизельный электровоз постоянного тока (применение

переменного тока исключается в связи с тем, что в тепловозах ток в моторы приходится подавать на расстояние всего нескольких метров), который сам на себе несет электрическую станцию и в общем представляет собой „теплоэлектровоз“, который, как электровоз с независимым источником энергии, должен быть совершенно так же, как и „аккумуляторный электровоз“, причислен к классу т. н. „автономной электрической тяги“ (электрической тяги без рабочих проводов). Однако, в жизни теплоэлектрические локомотивы, как локомотивы, имеющие в качестве первоисточника энергии тепловой двигатель, причисляются к классу „тепловой тяги“, в общем к тепловозам. В связи с этим тепловозам с электрической передачей в настоящем труде дано название „электротепловозы“.

Электротепловозы надежны в работе, весьма гибки в управлении, весьма просты в конструктивном отношении, в них возможна реализация полной мощности двигателя при любой скорости тепловоза и высоких значений силы тяги в момент трогания с места и разгона поезда, они имеют весьма высокую отдачу (общий коэффициент полезного действия), а именно—0,26—0,30, наконец они производят сравнительно незначительное воздействие на путь. Главнейшим недостатком электротепловозов является их большой вес (например тепловоз Э-Эл-2 весит в общем 125 т, тогда как равносильный ему паровоз Э весит всего 80,2 т), а следовательно, и сравнительно высокая стоимость их.

§ 3. Главнейшим преимуществом вообще тепловозов перед паровозами является меньшее расходование ими топлива по весу.

Для получения ежесекундной мощности в л. с. в течение часа надо затратить:

$$632 \text{ кал} = \frac{75 \cdot 60^3 \text{ кгм/ч}}{427 \text{ кгм/ч}},$$

где 427 кгм представляют собой т. н. механический эквивалент теплоты, т. е. количество работы, на которое затрачивается одна калория. Отсюда вообще расход топлива в час каким-либо двигателем на 1 л. с. определяется по формуле:

$$B_{\text{ч/л.с.}} = \frac{632}{Y \cdot K} (\text{кг}),$$

где:

Y —отдача данного тягового двигателя (полный коэффициент его полезного действия);

K —теплотворная способность сжигаемого топлива (в калориях).

Следовательно, часовой расход топлива паровозами и электротепловозами определится следующим образом.

П а р о в о з: $Y = 0,10$ (при перегретом паре и водоподогревателе).

$$K = \begin{cases} \text{при угле} & 6500 \text{ кал}, \\ \text{при мазуте} & 10000 \text{ кал}. \end{cases}$$

Следовательно:

при угле

$$B_{\text{ч/л.с.}} = \frac{632}{0,10 \cdot 6500} = 0,972 \text{ кг};$$

НБ
УДУНТ
(ДШТ)
11

при мазуте

$$B_{ч/с. л.} = \frac{632}{0,10 \cdot 10\,000} = 0,632 \text{ кг.}$$

Электротепловоз: $Y = 0,28$ (в среднем),
 $K = 10\,000$ кал (мазут).

Следовательно:

$$B_{ч/л. с.} = \frac{632}{0,28 \cdot 10\,000} = 0,226 \text{ кг.}$$

Отсюда получаем нижеследующие отношения расходов топлива по весу:

$$\frac{\text{Паровоз}}{\text{Тепловоз}} = \frac{\text{Уголь}}{\text{Мазут}} = \frac{0,972}{0,226} = 4,3;$$

$$\frac{\text{Паровоз}}{\text{Тепловоз}} = \frac{\text{Мазут}}{\text{Мазут}} = \frac{0,632}{0,226} = 2,8.$$

Как видно, электротепловоз расходует в общем топлива по крайней мере в 4 раза меньше, чем паровоз при угольном отоплении, и примерно в 3 раза меньше, чем паровоз при нефтяном отоплении. Примерно то же самое получается и в отношении тепловозов с неэлектрической передачей. Но не в одном меньшем расходовании топлива заключается преимущество всякого рода тепловозов перед паровозами, а вместе с тем и электровозами.

Главнейшие преимущества показаны в нижеследующей таблице.

Сравниваемый с тепловозом двигатель	Преимущества тепловоза				
Паровоз	Большой полный коэф. полезн. действия и в связи с этим меньший расход топлива	Отсутствие крупного расхода воды и в связи с этим возможность применения в безводных и маловодных районах, районах с неудовлетворительн. водой и районах вечной мерзлоты	Большие пробеги без набора топлива и месячные и в связи с этим лучший оборот подвижного состава	Постоянная готовность к работе	Отсутствие дыма и необходимости в приспособлениях для поворота
Электровоз	Т о ж е	Наличие автономности: является не привязанной к пути тяговой единицей	Возможность постепенности расходов по приобретению	Большая обеспеченность движения в районах военных действий	Т о ж е

Недостатками наиболее нас интересующих тепловозов—электротепловозов, по сравнению с паровозами являются, как отмечено было выше, их большой вес и в связи с этим их большая стоимость, но эти

С е р и я	Колесная формула	Год по- ступле- ния на сеть	Где строился или стро- ится	Сведения об испытании	Сцепной вес т	З а п а с в т			Полный рабочий вес т
						топлива	воды	смазки	
Щ-Эл-1.	1—10—1	1924	СССР, завод „Красный путиловец“.	Был испытан, ныне не работает	160	8	2	1	182
Э-Эл-2.	1—5—1	1925	Германия, завод Эсс- линген.	Был испытан, имеет паспорт.	91,9	4	1	1	125
Э-Мх-3.	2—5—1	1927	Германия, завод Го- генцоллерн.	Т о ж е	88	3,5	1	1	131
Э-Эл-4.	2—5—1	Строится	СССР, завод „Красный путиловец“.	—	83,5	4	2	1,35	127
Э-Эл-5.	2—5—1	1931	Германия.	Испытывается	90	5	1,5	1	136
О-Эл-6.	1—4—1	1931	СССР, Коломенский завод.	Т о ж е	72	2,5	1,2	0,25	100
О-Эл-7	1—4—0	1931	СССР, Коломенский завод.	Т о ж е	84,4	2,4	1,2	0,25	98,7
Э-Эл-8.	2—5—1	Строится	Германия, завод Круп- па.	—	105	5—6	2	0,5	146,8
Э-Эл-9 (дубл.)	2—5—1	Строится	—	—	—	—	—	—	—
О-Эл-10 (дубл.)	1—4—1	Строится	СССР, Коломенский завод.	—	—	—	—	—	—
О-Эл-11 (дубл.)	1—4—0	Строится	—	—	—	—	—	—	—

недостатки значительно компенсируются отсутствием при тепловозах тендеров.

§ 4. Благодаря указанным выше преимуществам перед паровозами, тепловозы имеют громадное значение для ряда наших железных дорог. Вопрос о тепловозах был поднят у нас в период мировой войны, однако реальное значение он получил лишь после Октябрьской революции, в то время, когда у нас началось восстановление разрушенного ж.-д. транспорта. Постройка тепловозов была начата у нас в 1922 г. в Ленинграде, на заводе „Красный путиловец“, а одновременно с этим два опытных тепловоза, по проектам русских инженеров, были заказаны в Германии. С тех пор проектирование и постройка у нас тепловозов стали развиваться, в результате чего у нас сейчас частью уже имеются, частью строятся в общем 11 серий тепловозов, общие сведения о которых приведены в таблице на стр. 13 (в обозначениях серий обозначают: первая буква—мощность тепловоза в сравнении с паровозом, второе обозначение—система передачи, цифра—очередной номер выпуска тепловоза).

Из приведенной таблицы видно, что у нас на сети в настоящее время фактически имеется 6 тепловозов, из которых один (Щ-Эл-1) не работает, его намечено переделать в более мощный тепловоз. Затем видно, что в качестве тепловозов для наших линий, намеченных в первую очередь к переводу на тепловозную тягу, у нас выбраны электро-тепловозы, доказавшие на примере тепловоза Э-Эл-2 свою жизнеспособность и пока лучшую эксплуатационную способность, чем тепловоз Э-Мх-3.

§ 5. В связи с результатами семилетней опытной и эксплуатационной работы наших тепловозов в плане реконструкции нашего ж.-д. транспорта во вторую пятилетку намечено внедрение тепловозной тяги на 5 178 км существующих и на 2 375 км вновь намеченных к постройке жел.-дорог., в общем в безводных и маловодных районах на юго-востоке (Сталинград—Тихорецкая), Сев. Кавказе (Сальск—Батайск), Казакстане (Оренбург—Ташкент, Караганда—Джезказган, Караганда—Балхаш, Орск—Актюбинск, сев. часть Чарджуй—Аральское море и Средней Азии (Ташкент—Красноводск, Каган—Сталинабад, Мерв—Кушка, Луговая—Фрунзе, южная часть Чарджуй—Аральское море).

НБ
УДУНТ
(ДШТ)

ТЕОРИЯ

§ 6. Благодаря достаточно полным материалам, добытым опытами над тепловозом Э-Эл-2 (в былое время Ю³ № 001), которые были произведены нашими инженерами в период времени 1923—1925 гг. предварительно в Германии, а затем окончательно на путях СССР, расчеты по электротепловозной тяге могут в настоящее время производиться с такой же степенью точности, что и по паровозной тяге. Очень многое, сказанное в трудах ряда авторов относительно теории паровозной тяги поездов, остается в силе и по отношению к тепловозной тяге, за исключением лишь тех вопросов, которые связаны с резким различием конструкций самих тепловозов и паровозов, а именно—с наличием в тепловоза хинного генератора, энергии и наличием передаточного механизма. Определенно сказать, в расчетах по тепловозной тяге должны приниматься иные данные для определения основного сопротивления тепловозов, должны применяться иные способы расчета силы тяги тепловозов и расхода топлива тепловозами, притом расхода, как непосредственного, а не просто как расхода, связанного с расходом воды из тендера, как это имеет место при паровозной тяге, наконец несколько измененный способ определения веса поезда. Эти вопросы, являющиеся, так сказать, новыми вопросами для лиц, знакомых с тяговыми расчетами при паровозной тяге, лишь и рассматриваются ниже, причем рассматриваются они по отношению лишь тепловозов с электрической передачей, какого рода передача принята у нас, как сказано было выше, в качестве нормальной передачи для тепловозов, предусматриваемых к введению как на существующих линиях, намеченных в первую очередь к переводу на тепловозную тягу, так и на новых линиях, с самого начала проектируемых под тепловозную тягу. Так как на ближайший отрезок времени у нас намечены к обращению тепловозы с электрической передачей, в основном подобной передаче тепловоза Э-Эл-2, только с заменой компрессорного двигателя безкомпрессорным той же мощности и с изменением холодильников, то весьма важно быть знакомым со всеми данными имеющегося для тепловоза Э-Эл-2 паспорта, почему эти данные и приводятся ниже почти в полном объеме.

В связи с сказанным выше в результате излагаемая ниже теория является лишь частично теорией вообще тепловозной тяги, а полностью только электротепловозной тяги, причем она представляет собой, как было отмечено выше, не полную теорию электротепловозной тяги поездов, а лишь необходимую дополнительную к теории паровозной тяги.

1. Основное естественное сопротивление электротепловоза

§ 7. Тепловоз так же, как и паровоз, представляет собой одновременно и повозку и машину. Поэтому основное естественное со-

противление тепловоза также складывается из двух частей: сопротивления тепловоза как повозки и сопротивления его как машины—т. н. внутренних сопротивлений тепловоза. Разумеется, что способ определения полного основного сопротивления тепловоза в основном ничем не отличается от способа определения того же сопротивления паровоза. Весь вопрос лишь в том, что удельное основное сопротивление тепловоза иное, чем паровоза, в виду резкого различия их конструкций.

Ломоносовым были произведены опыты по определению удельного основного сопротивления электротепловоза, с одной стороны, как повозки при нормальной работе, для чего щетки были подняты (этого рода опыты эквивалентны опытам с паровозами со снятыми шатунами), с другой же стороны, и как повозки и как машины при движении без тока—щетки были опущены (этого рода опыты эквивалентны опытам с паровозами при закрытом регуляторе). На основании этих опытов получены нижеследующие формулы Успенского для определения удельного основного сопротивления электротепловоза как повозки (с поднятыми щетками):

$$w_{o/n}^{эм} = 2,85 + 0,0009 V^2 \text{ кг/т};$$

как повозки и как машины при движении без тока (с опущенными щетками):

$$w_{o(n \div м/б. т)}^{эм} = w_{o/n}^{эм} + w_{м/б. т}^{эм} = 3,1 + 0,0014 V^2 \text{ кг/т}.$$

Отсюда получается следующая формула для удельного сопротивления электротепловоза как машины, при движении без тока:

$$w_{м/б. т}^{эм} = 0,25 + 0,0005 V^2 \text{ кг/т}.$$

Эти три формулы, разумеется, пригодны лишь для установившегося движения поездов, и приведены в паспорте электротепловоза Э - Эл - 2.

Ломоносов считает более правильными следующие формулы:

$$w_{o/n}^{эм} = 3 + 0,0008 V^2 \text{ кг/т};$$

$$w_{м/б. т}^{эм} = 0,0007 V^2 \text{ кг/т};$$

$$w_{o(n \div м/б. т)}^{эм} = 3 + 0,0015 V^2 \text{ кг/т}.$$

Результаты, получаемые по тем и другим формулам, отличаются на ничтожную величину—на 2—5%, в зависимости от скорости, так что в общем с одинаковым успехом могут применяться либо одни, либо другие формулы.

Если сравнить удельные основные сопротивления электротепловоза, как повозки, при нормальной работе с такого же рода сопротивлениями паровоза, то легко можно увидеть, что названные сопротивления электротепловоза несколько больше, чем у паровозов. Зато удельные основные сопротивления электротепловоза как повозки и как машины при движении без тока во много раз меньше (на 30—40%), чем у паровозов при движении с закрытым регулятором. Это, надо заметить, большой плюс для электротепловозов, так как благодаря меньшему удельному основному сопротивлению электротепловозы, ведя вагонные составы того же веса, что и паровозы, могут проходить без затраты тока (иначе говоря, топлива) такие скаты, на которых паровозы обязательно должны работать с паром, т. е. с расходом топлива. Следова-

тельно, при электротепловой тяге величина так называемого „предельного безвредного уклона“ ($i_{п. бв}$) много (на 20—25%) меньше, чем при паровой тяге ($i_{п. бв}'' = w_{о/з. п}; i_{п. бв}''' = w_{о/б. т}$).

В заключение надо заметить, что при расчетах, не требующих особой точности, можно в отношении основного удельного сопротивления не выделять электротепловоз и определять среднее основное удельное сопротивление товарного поезда в целом по формуле Baldwin'a:

$$w_0 = 1,5 + 0,05V \text{ (кг/т)}.$$

II. Сила тяги электротепловоза

А. Общие указания

§ 8. Процесс получения силы тяги во всяком тепловозе, как и в паровозе, основан на трех главных последовательных процессах трансформации энергии в тепловозе тремя его основными частями: двигателем (дизелем), машиной (передаточным механизмом) и движущими колесами. В частности в электротепловозе сначала двигатель (дизель) превращает химическую энергию топлива (мазута) в скрытую энергию газа, затем машина (передаточный механизм), переработав при помощи динамомшины принятую от двигателя нагрузку в электрическую энергию, передаваемую затем тяговым моторам на осях колес, превращает последнюю в механическую энергию (на ободе движущих колес), наконец одновременно движущие колеса при помощи рельсов превращают эту механическую энергию во внешнюю работу силы тяги. Разумеется, для того, чтобы последняя имела место, необходимо, чтобы к колесам электротепловоза, как и паровоза (вообще всякого локомотива), была приложена внешняя сила в виде горизонтальной, направленной в сторону движения реакции рельсов на названные колеса (необходимо наличие сцепления).

Указанные три трансформатора энергии на тепловозе (двигатель, передаточный механизм, экипаж) имеют каждый свою предельную производительность (работоспособность) в отношении переработки энергии того или иного вида, так как при проектировании всякого тепловоза не представляется возможным достичь равенства всех этих производителей при всех условиях. Эти предельные производительности в результате и ограничивают величину силы тяги тепловоза. Поэтому по ограничениям величины силы тяги всякого тепловоза необходимо различать три рода последней (как и в паровозе, но не в электровозе, получающем энергию от источника тока неограниченной практически мощности): 1) силу тяги по производительности двигателя (дизеля), — дизельную (Z_d), 2) силу тяги по производительности машины (передаточного механизма) — машинную (Z_m) и 3) силу тяги по величине сцепления колес с рельсами, — сцепную (Z_c).

Затем во всяком тепловозе, как и в паровозе и в электровозе, силу тяги каждого из указанных родов необходимо различать трех видов: а) индикаторную — полную данную силу тяги (Z''), б) касательную, — эффективную данную силу тяги на ободе колес (Z') и в) полезную, — данную силу тяги на крюке (Z'').

При всякой тепловозной тяге так же, как и при паровой и электрической, удобнее всего при расчетах пользоваться

касательной силой тяги. Поэтому ниже всюду, где это не оговорено особенно, имеется в виду именно касательная сила тяги (никакая другая).

Б. Определение разных родов сил тяги

1. Дизельная сила тяги электротепловоза (Z_δ)

§ 9. Дизельная сила тяги тепловоза, как сила тяги по генератору энергии, определяется так же, как и котловая сила тяги паровоза, по формуле:

$$Z_\delta = \frac{270 \cdot N_\delta}{V} \text{ кг},$$

где:

N_δ — мощность дизеля в л. с.,
 V — скорость движения в км/ч.

Так как мощность дизеля имеет два ограничения: а) по режиму дизеля и б) по холодильнику, то в результате и дизельная сила тяги тепловоза имеет два ограничения: а) по режиму дизеля (Z_δ^p) и б) по холодильнику (Z_δ^x).

а) Сила тяги по режиму дизеля (Z_δ^p)

§ 10. Режим всякого дизеля обуславливается *наполнением* (форсировкой) последнего и *числом его оборотов*.

Надо заметить, что под *наполнением* в настоящее время у нас установлено понимать „действительное“ наполнение (σ), т. е. вес (в граммах) подаваемого в один цилиндр дизеля за один рабочий такт топлива, а не условное наполнение (ϵ) в виде числа делений сектора топливного насоса, как это принималось Ломоносовым при его опытах над тепловозами, так как значения условного наполнения, зависят от первоначальной установки приборов регулирования топливного насоса и от разработки шарнирных соединений тяг последнего, не определяют указанной выше подачи топлива в цилиндры дизеля. Кроме того градуировка сектора топливного насоса является для каждого двигателя индивидуальной, почему и сравнение характеристик двух одинаковых двигателей невозможно, если в основу принимать установку названного сектора.

Так как значение наполнения σ определяется установкой ϵ ручного регулирования топливного насоса (при данном его состоянии), то между σ и ϵ должна существовать определенная зависимость. Для электротепловоза Э-Эл-2 эта зависимость следующая:

при $\epsilon = 2$	$\sigma = 1,5$ г
при $\epsilon = 3$	$\sigma = 2,0$ „
при $\epsilon = 4$	$\sigma = 2,5$ „
при $\epsilon = 5$	$\sigma = 3,0$ „
при $\epsilon = 6$	$\sigma = 3,5$ „

Мощность дизеля по наполнению (σ) и числу его оборотов в секунду (n_δ) определяется из равенства работы, совершаемой им в секунду. В четырехтактном двигателе, — двигателе применяемом в тепловозах, — это равенство выражается, очевидно, так:

$$75N_\delta^u = m_u \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot p_u \cdot \frac{n_\delta}{2}$$

где:

N_d^u — индикаторная мощность дизеля (л. с.);

75 — работа 1 л. с. в секунду (кг/сек.);

m_u — число цилиндров дизеля;

d — диаметр цилиндров (см),

l — ход поршня (м);

p_u — индикаторное давление (кг/см²);

n_d — число оборотов дизеля в секунду;

2 — характеристика четырехтактного двигателя (рабочий ход имеется один на два оборота двигателя¹).

Отсюда получается:

$$N_d^u = \frac{m_u}{600} \pi d^2 l \cdot p_u n_d = A_d p_u n_d \text{ [л. с.]},$$

где A_d для определенного дизеля, как видно, величина постоянная. Для дизеля электротепловоза Э-Эл-2 $A_d = 26,7$.

Надо заметить, что индикаторное давление p_u зависит от наполнения σ . Для дизеля электротепловоза Э-Эл-2 эта зависимость следующая:

при $\sigma = 1,5$ г	$p_u = 4,6$ кг/см ²
при $\sigma = 2$ г	$p_u = 6,0$
при $\sigma = 2,5$ г	$p_u = 7,4$
при $\sigma = 3$ г	$p_u = 8,5$ "
при $\sigma = 3,5$ г	$p_u = 9,4$ "

Таким образом мощность N_d дизеля и зависит от σ и n_d :

$$N_d^u = f(\sigma, n_d).$$

σ	η_m		
	$n_d = 4,5$	$n_d = 5$	$n_d = 5,5$
1,5	0,58	0,57	0,56
2	0,66	0,65	0,64
2,5	0,70	0,69	0,68
3	0,74	0,73	0,72
3,5	0,76	0,745	0,73

Очевидно, мощность дизеля на валу (эффективная мощность) составляет:

$$N_d^e = \eta_m N_d^u = \eta_m A_d p_u n_d \text{ [л. с.]},$$

где η_m — механический коэффициент полезного действия дизеля брутто. Для дизеля электротепловоза Э-Эл-2 он составляет, в зависимости от наполнения σ и числа оборотов n_d , следующие величины:

Из всего сказанного ясно, что дизельная сила тяги по режиму в конечном итоге зависит от V , σ и n_d :

$$Z_d^p = f(V, \sigma, n_d).$$

Следовательно, для каждого числа n_d оборотов дизеля в секунду получаются свои кривые:

$$Z_d^p = f(V, \sigma),$$

¹ Цикл операций в четырехтактном двигателе включает в себе четыре хода поршня: первый ход вниз — ход всасывания (в цилиндр всасывается из карбюратора смесь нефтяных паров с воздухом; второй обратный ход вверх — ход сжатия (смесь сжимается, в конце хода зажигается от искры); третий ход вторично вниз — ход расширения (сжатая смесь выталкивает поршень; это — рабочий ход); наконец четвертый ход — вторично вверх — ход выталкивания (из цилиндра выталкиваются отработавшие газы).

Таким образом в названном двигателе рабочий ход (расширение газов) имеется один на четыре хода поршня, т. е. на два оборота двигателя.

которые, как кривые касательной дизельной силы, тоже строятся для различных значений σ на основании следующей формулы:

$$Z_{\partial}^{plk} = \frac{270 \eta_{ж} A_{\partial} p_{\partial} n_{\partial}}{V} \text{ кг.}$$

б) Сила тяги по холодильнику (Z_{∂}^x)

§ 11. Установлению ограничения дизельной силы тяги по холодильнику, суть какового ограничения заключается в том, что вода, поступающая в холодильник, не должна иметь температуру выше 80°Ц , должно предшествовать изучение охлаждающей способности холодильника, установленного на тепловозе.

Рассмотрим сперва работу холодильника в состоянии теплового равновесия, иначе говоря, в предположении, что температура воды τ и температура воздуха t приняли уже постоянные значения, соответствующие данному режиму дизеля. Вместе с тем предположим, что холодильник не имеет наружного охлаждения, т. е. что все тепло, отдаваемое водой, воспринимается воздухом, подаваемым вентиляторами.

Обозначим через:

H —полную поверхность охлаждения холодильника (м^2);

a —удельный коэффициент теплоотдачи холодильника, т. е. коэффициент на 1 м^2 (количество тепла, отдаваемое холодильником воздуху с 1 м^2 поверхности за единицу времени при разности температур воды и воздуха в 1°Ц);

W —часовой расход воды (кг);

L —часовой расход воздуха (кг);

t_{ex} —температуру воздуха при входе в холодильник ($^{\circ} \text{Ц}$), т. е. температуру наружного воздуха;

$t_{вых}$ —температуру воздуха при выходе из холодильника ($^{\circ} \text{Ц}$);

τ_{ex} —температуру воды при входе в холодильник ($^{\circ} \text{Ц}$);

$\tau_{вых}$ —температуру воды при выходе из холодильника ($^{\circ} \text{Ц}$);

Δ —тепловой напор, т. е. среднюю разность температур воды и воздуха в холодильнике ($^{\circ} \text{Ц}$);

c —удельную теплоемкость воздуха, т. е. количество тепла, потребное для повышения температуры 1 кг воздуха на 1°Ц .

Тогда можем написать следующие выражения:

для количества тепла, передаваемого поверхностью охлаждения в единицу времени (напр. в час):

$$Q = \Delta a H; \quad (\text{А})$$

для количества тепла, отдаваемого водой, при теплоемкости ее, равной единице:

$$Q = (\tau_{ex} - \tau_{вых}) W; \quad (\text{Б})$$

наконец для количества тепла, получаемого воздухом:

$$Q = (t_{вых} - t_{ex}) c L, \quad (\text{В})$$

причем в наших предположениях все эти Q равны между собой.

Так как $(\tau - t)$ не есть величина постоянная, то правильнее было бы первое выражение написать так:

$$Q = a \int_0^H (\tau - t) dH.$$

Однако, согласно Ostertag'у, с достаточной точностью можно считать, что $(\tau - t)$ изменяется по закону прямой, как это изображено на фиг. 2.

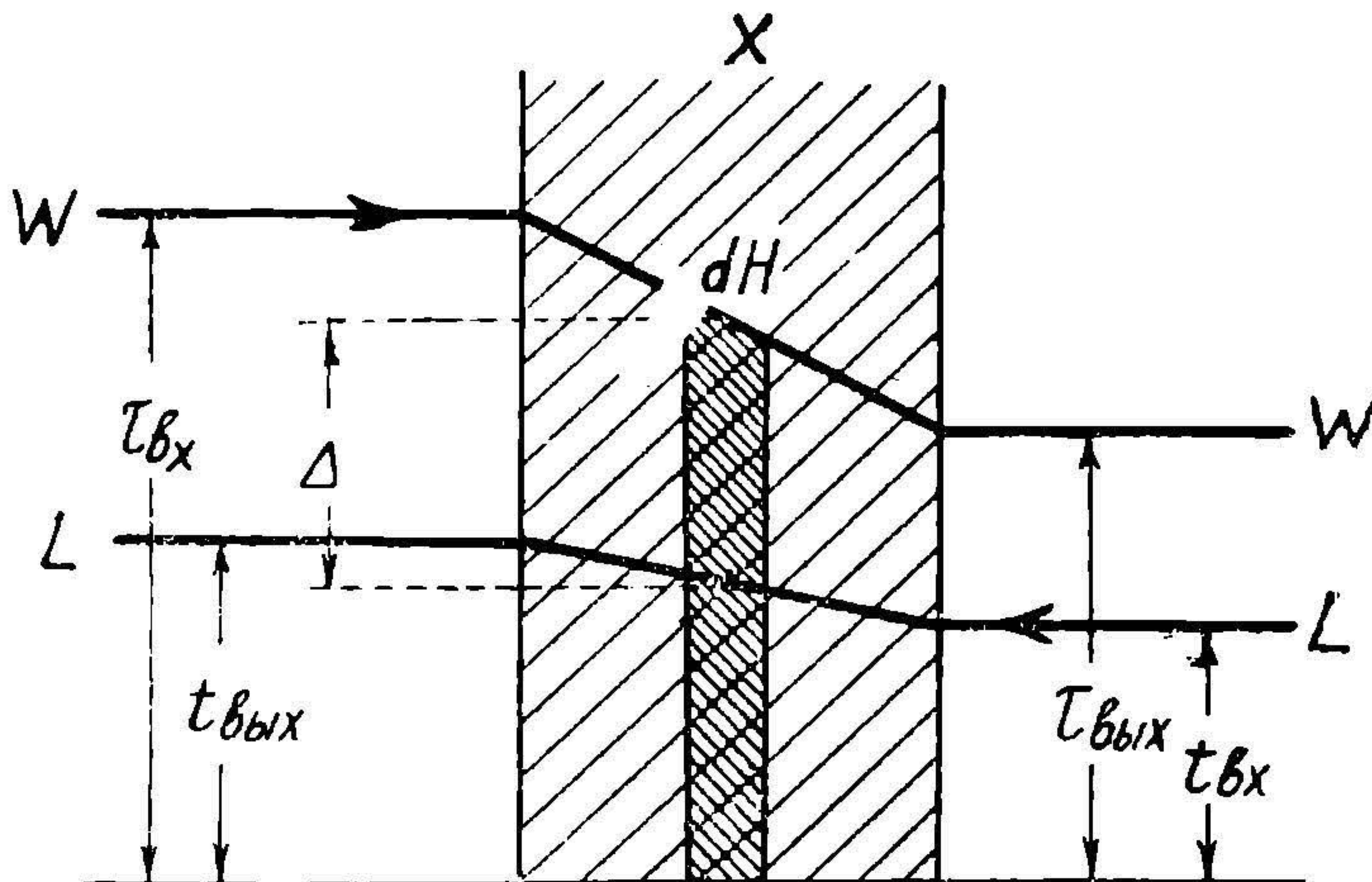
В этом случае:

$$\frac{dQ}{aH} = \text{const} = \Delta;$$

$$\Delta = \frac{\tau_{ex} + \tau_{вых}}{2} - \frac{t_{ex} + t_{вых}}{2},$$

и тогда, вставляя это в выражение (А), получаем:

$$\tau_{ex} - t_{ex} + \tau_{вых} - t_{вых} = \frac{2Q}{dH} \quad (A')$$



Фиг. 2.

В таком же виде можно представить выражения (Б) и (В), а именно

$$\tau_{ex} - \tau_{вых} = \frac{Q}{W}; \quad (Б')$$

$$t_{вых} - t_{ex} = \frac{Q}{cL} \quad (В')$$

Складывая эти три равенства, получаем:

$$\tau_{ex} - t_{ex} = \frac{Q}{J}, \quad (Г)$$

где

$$J = \frac{1}{\frac{1}{aH} + \frac{1}{2W} + \frac{1}{2cL}}$$

и называется *внутренней характеристикой холодильника*.

Формула (Г) показывает, что в основное уравнение теории холодильника входит не τ_{ex} , а только разность $\tau_{ex} - t_{ex}$, и затем, что эта разность прямо пропорциональна количеству тепла, передаваемого дизелем воде, и обратно пропорциональна характеристике холодильника.

В действительности наружное охлаждение холодильника имеет место, и потому через воздух, подаваемый вентиляторами, отводится не все тепло Q , а лишь часть его которую назовем через Q_x ; другая же часть, $Q_n = Q - Q_x$, передается через железные части холодильника непосредственно наружному воздуху. Это количество тепла пропорционально разности между средней температурой воды в холодильнике и температурой наружного воздуха, почему можем написать:

$$Q_n = a_n H_n \left(\frac{\tau_{ex} + \tau_{вых}}{2} - t_{ex} \right), \quad (Д)$$

где

H_n — поверхность наружного охлаждения,
 a_n — ее удельный коэффициент теплоотдачи.

При таких предположениях вышеуказанные основные уравнения (А') и (В') несколько изменяют свой вид. Подставляя в формулах (А') и (В') вместо Q величину $Q_x = Q - Q_n$ [формула (В') остается в прежнем виде], получаем:

$$\tau_{ex} - t_{ex} + \tau_{вых} - t_{вых} = \frac{2Q_x}{aH}; \quad (А'')$$

$$\tau_{ex} - \tau_{вых} = \frac{Q}{W}; \quad (Б')$$

$$t_{вых} - t_{ex} = \frac{Q_x}{cL}. \quad (В'')$$

Вместе с тем перепишем формулу (Д) в таком виде:

$$\tau_{ex} + \tau_{вых} - 2t_{ex} = \frac{2Q_n}{a_n H_n}. \quad (Д')$$

Производя теперь совместное решение последних четырех уравнений (А'', Б', В'', Д') и еще уравнения $Q_x + Q_n = Q$, получаем для рассматриваемого случая наличия наружного охлаждения:

$$\tau_{ex} = t_{ex} = \frac{Q}{X} \quad (Е)$$

где:

$$X = \frac{1}{\frac{1}{2W} + \frac{1}{aH + a_n H_n \frac{2cL + aH}{2cL}} + \frac{1}{2cL + a_n H_n \frac{2cL + aH}{aH}}}$$

и называется *полной характеристикой холодильника*.

Так как в этой характеристике часовой расход воды W и часовой расход воздуха L зависит от числа n_d оборотов дизеля, то, следовательно:

$$X = f(n_d).$$

Формула (Е) по существу не отличается от формулы (Г), причем в случае отсутствия наружного охлаждения, т. е. когда $H_n = 0$, формула (Е) обращается в формулу (Г), так как в данном случае X обращается в J .

Формула (Е) показывает, что даже при наличии наружного охлаждения разность между температурами воды, поступающей в холодильник, и наружного воздуха прямо пропорциональна количеству отводимого этой водой тепла и обратно пропорциональна полной характеристике холодильника.

Обычно считают

$$Q = qN_{\partial},$$

где q представляет собой количество тепла, отдаваемое водой в час, приходящееся на 1 л. с., — количество, зависящее в некоторой степени от n_{∂} и σ , функцией от каковых переменных является и N_{∂} .

Следовательно, в общем:

$$Q = f(n_{\partial}, \sigma).$$

Полная характеристика холодильника, как было сказано выше, является функцией от n_{∂} :

$$X = f_1(n_{\partial}).$$

Таким образом:

$$\frac{Q}{X} = \tau_{ex} - t_{ex} = f_2(n_{\partial}, \sigma).$$

Величины

$$\tau_{ex} - t_{ex} = f_2(n_{\partial}, \sigma)$$

определяются опытами, на основании данных которых для каждого из значений n_{∂} и строится своя кривая:

$$80 - t_{ex} = f(\sigma),$$

отвечающая полному использованию холодильника, определяемому условием:

$$\tau_{ex} = 80^{\circ} \text{ Ц.}$$

Имея подобные кривые для различных значений числа оборотов дизеля в секунду n_{∂} (фиг. 3), можно для любой температуры наружного воздуха t_{ex} и для любого числа n_{∂} найти значения наполнения σ , отвечающего условию полного использования холодильника.

Очевидно, что при температуре наружного воздуха, например $t_{ex} = +10^{\circ} \text{ Ц.}$, вода будет поступать в холодильник при $\tau_{ex} = 80^{\circ} \text{ Ц.}$ в том случае, если холодильник будет реализовать

$$\tau_{ex} - t_{ex} = 70^{\circ}.$$

Из приведенной диаграммы видно, что при $n_{\partial} = 4,5$ это соответствует $\sigma = 2,70$; при $n_{\partial} = 5$ — $\sigma = 3$ и т. д.

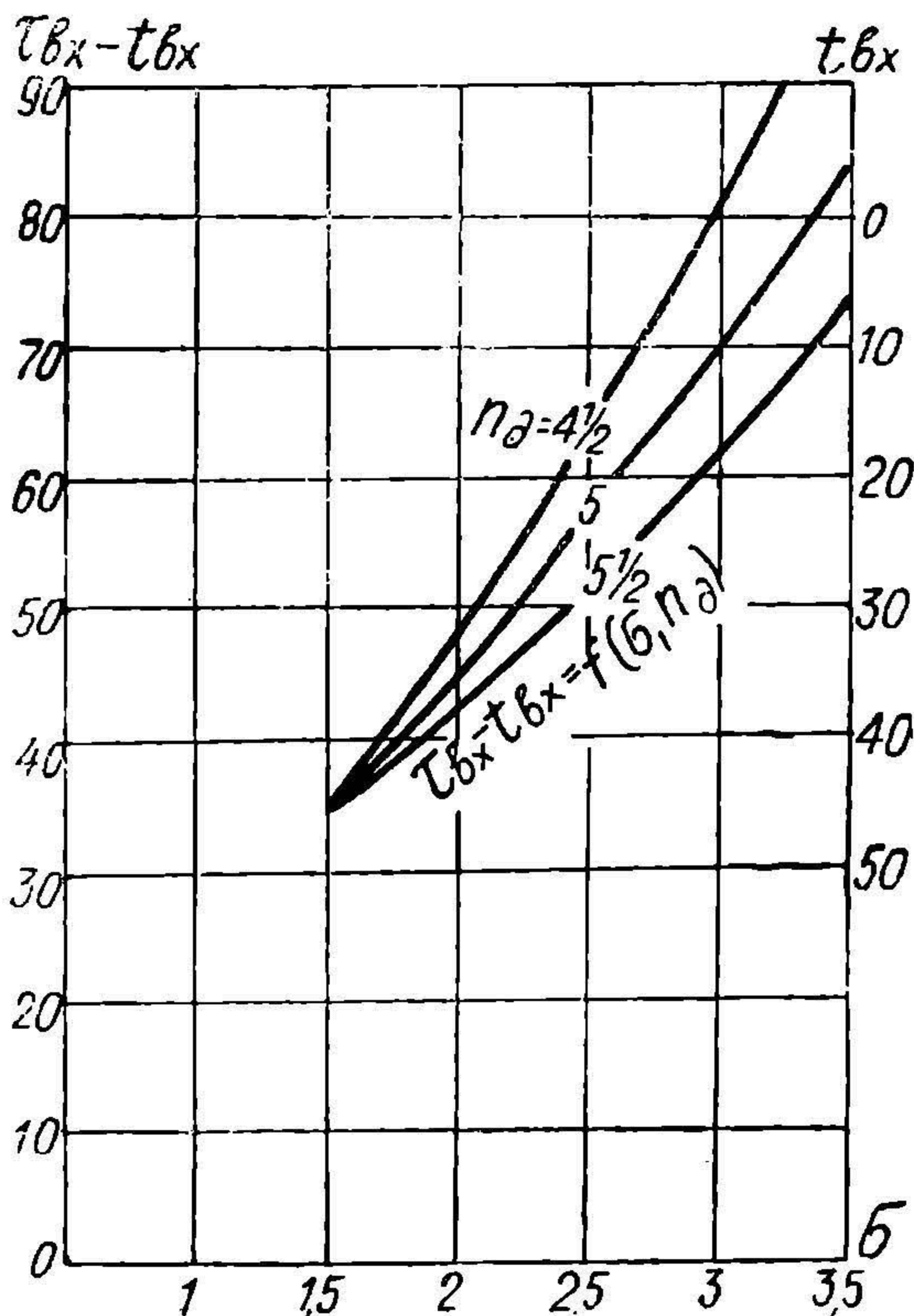
Следовательно, на данной диаграмме пересечения кривых с прямыми:

$$\tau_{ex} - t_{ex} = 90^{\circ}$$

$$\tau_{ex} - t_{ex} = 80^{\circ}$$

и т. д.

или, что одно и то же, с прямыми



Фиг. 3

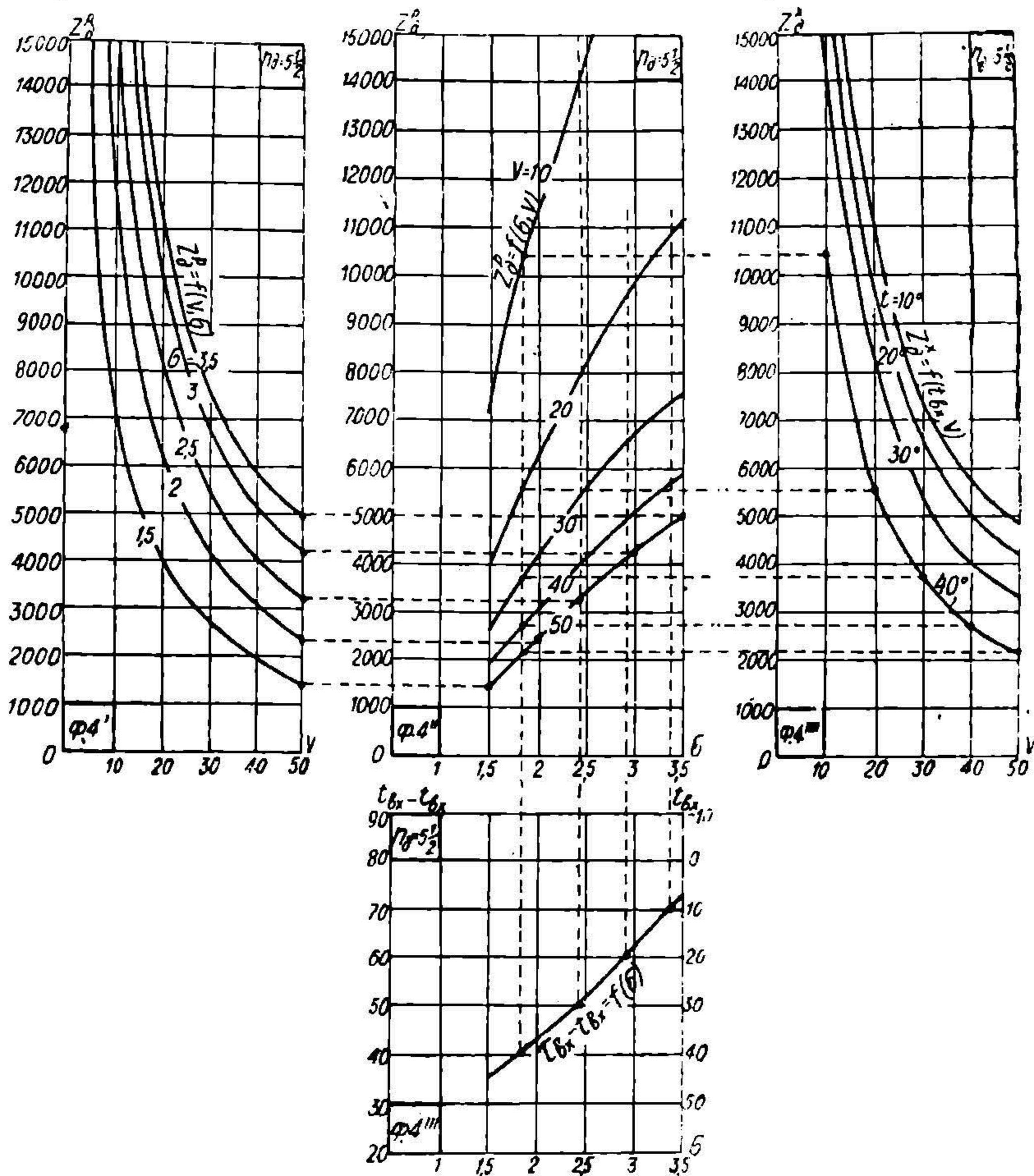
НБ
УДУНТ
(Фиг. 3)

$$t_{ex} = -10^{\circ};$$

$$t_{ex} = 0^{\circ}$$

и т. д.

дают нам комбинации n_0 и σ , которые соответствуют данной температуре t_{ex} наружного воздуха и полному использованию холодильника, определяемому, как было указано выше, условием:



Фиг. 4.

$$\tau_{ex} = 80^{\circ} \text{ Ц.}$$

Вследствие этого возможно по имеющимся для разных значений n_0 кривым силы тяги $Z^p = f(V)$, отвечающим разным наполнениям σ , строить кривые силы тяги $Z^x = f(V)$, отвечающие разным температурам t_{ex} наружного воздуха и условию полного использования холодильника:

$$\tau_{ex} = 80^{\circ} \text{ Ц.}$$

Для этого надо прежде всего кривые силы тяги $Z^p = f(V)$ для разных наполнений σ при определенных n_0 перестроить в кривые $Z^p = f(\sigma)$ для разных скоростей V , затем по кривым $(\tau_{ex} - t_{ex}) = f(\sigma)$

отвечающим разным n_d и условию $\tau_{ex} = 80^\circ \text{Ц}$ (фиг. 3), найти комбинации n_d и σ , соответствующие разным температурам наружного воздуха t_{ex} , после чего на кривых $Z_d^p = f(\sigma)$ для разных скоростей V найти отвечающие найденным значениям σ ординаты Z_d^p . Эти ординаты и будут ординатами кривых $Z_d^x = f(V)$, отвечающих разным температурам наружного воздуха t_{ex} .

Сказанное понятно из примера на фиг. 4, где все диаграммы (фиг. 4', 4'', 4''', 4''') относятся к одному определенному числу n_d оборотов дизеля тепловоза Э-Эл-2, а именно: $n_d = 5,5$, причем диаграмма $Z_d^x = f(V)$ (фиг. 4''') построена по σ , найденным по кривой, отвечающей $n_d = 5,5$, имеющейся на вышеприведенной диаграмме $\tau_{ex} - t_{ex} = f(\sigma)$ (фиг. 3).

На практике незачем строить кривые $Z_d^x = f(V, t_{ex})$ для всех возможных значений числа n_d оборотов дизеля, так как практический интерес представляют такого рода кривые лишь для $n_d = \max$, — только эти кривые отвечают случаю полного использования холодильника, иначе говоря, только для $\max n_d$ кривые $Z_d^x = f(V, t_{ex})$ представляют собой графическое изображение ограничения силы тяги по холодильнику.

Кстати заметить, как видно из сравнения фиг. 4' и 4''', дизельную силу тяги электротепловоза Э-Эл-2 ограничивает режим дизеля, а не холодильника.

2. Машинная сила тяги (Z_m)

§ 12. Машинная сила тяги тепловоза определяется по аналогичной формуле, как и дизельная, а именно:

$$Z_m = \frac{270N_m}{V}$$

где:

N_m — мощность машины (электропередачи) (л. с.),

V — скорость движения (км/ч).

Так как мощность электрической передачи в тепловозе имеет два ограничения: а) по генератору (по возбуждению в динамомашине) и б) по тяговым моторам, то в результате машинная сила тяги тепловоза имеет тоже два ограничения: а) по генератору (Z_m^g) и б) по тяговым моторам (Z_m^{mm}).

а) Сила тяги по генератору (Z_m^g)

§ 13. Динамомашина принимает от дизеля определенную нагрузку при определенном числе n_d его оборотов. Эту нагрузку она должна переработать в электрическую энергию и затем передать ее движущим колесам при любом числе n_m их оборотов.

Нагрузкой, которую динамомашина принимает от дизеля, является мощность последнего на валу, т. е.:

$$N_d^g = \eta_m N_d^u.$$

Следовательно, динамомашина (генератор тока) должна иметь мощность:

$$N_m^g = N_d^g = f(\sigma, n_d) = \frac{EI_g}{736} (\text{л. с.}) = \frac{EI_g}{1000} (\text{киловатт}),$$

где:

E —напряжение на зажимах генератора (вольтаж);

I_2 —сила тока в обмотке (ампераж);

736—число ватт, которому равна лошадиная сила.

Нагрузкой же, которую получают движущие колеса, является касательная мощность (на ободе колес), которая равна:

$$N_{\text{м}}^{\text{с/к}} = \eta_{\text{г}} N_{\text{г}}^{\text{с}} = \eta_{\text{г}} \frac{EI_2}{736} \text{ (л. с.)},$$

где:

$\eta_{\text{г}}$ —коэффициент полезного действия электропередачи $= \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{тм}} \cdot \eta_{\text{з}}$ ($\eta_{\text{г}}$, $\eta_{\text{тм}}$ и $\eta_{\text{з}}$ —коэффициенты полезного действия соответственно генератора, тяговых моторов и зубчатой передачи), составляющий 0,80—0,85, или:

$$N_{\text{м}}^{\text{с/к}} = m_{\text{тм}} \frac{\eta_{\text{тм+з}} EI_{\text{тм}}}{736} \text{ (л. с.) }^1,$$

где:

E —электродвижущая сила тяговых моторов;

$I_{\text{тм}}$ —сила тока в их обмотках;

$m_{\text{тм}}$ —число электромоторов в тепловозе;

$\eta_{\text{тм+з}}$ —коэффициент полезного действия тяговых моторов и зубчатой передачи $= \eta_{\text{тм}} \cdot \eta_{\text{з}}$, составляющий 0,85—0,90.

Назначение всякого передаточного механизма в электротепловозе заключается в том, чтобы нагрузку, полученную динамомашинной от дизеля при определенном числе его оборотов $n_{\text{д}}$ и, следовательно, при определенном числе оборотов самой динамомашинны $n_{\text{д}}$, передать на колеса при любом числе их оборотов $n_{\text{к}}$, т. е. в том, чтобы произвольно менять соотношение того и иного числа оборотов:

$$\varphi = \frac{n_{\text{д}}}{n_{\text{к}}}$$

В электрической передаче это делается изменением вольтажа E . Максимум напряжения, которое может быть достигнуто, зависит от числа $n_{\text{д}}$ оборотов динамомашинны, зависящего от числа $n_{\text{д}}$ оборотов дизеля [$n_{\text{д}} = f(n_{\text{д}})$]. Это и определяет ограничение по генератору мощности, а следовательно, и силы тяги электротепловоза,—ограничение, являющееся в результате ограничением по возбуждению, так как вольтаж изменяется посредством изменения сопротивления в обмотке возбуждения.

Вольтаж изменяется прямо пропорционально числу оборотов $n_{\text{д}}$, следовательно, предельный по возбуждению вольтаж падает вместе с числом оборотов дизеля. Но в зависимости от нагрузки дизеля тот же самый вольтаж будет соответствовать разным скоростям.

¹ Указанная формула предполагает наличие полной идентичности электромеханических характеристик отдельных электромоторов тепловоза, что, строго говоря, и должно иметь место в каждом тепловозе и может быть достигнуто путем подбора для отдельных тепловозов электромоторов с совпадающими характеристиками. В случае отсутствия почему-либо указанного условия формула должна иметь следующий вид:

$$N_{\text{м}}^{\text{с/к}} = \sum \frac{\eta_{\text{тм+з}} E_{\text{тм}} I_{\text{тм}}}{736} \text{ (л. с.)},$$

где $E_{\text{тм}}$ —электродвижущая сила в каждом отдельном моторе.

$I_{\text{тм}}$ —сила тока в его обмотке.

В связи с сказанным в общем ограничение касательной силы тяги по генератору определяется по формуле:

$$Z_{\kappa}^{2/\kappa} = \frac{270 N_{\kappa}^{2/\kappa}}{V_{\kappa}},$$

где:

$N_{\kappa}^{2/\kappa}$ — касательная мощность тепловоза (на ободу колес);

V_{κ} — предельная скорость по возбуждению.

Касательная мощность электротепловоза по генератору, как объяснено выше:

$$N_{\kappa}^{2/\kappa} = \eta_g N_{\kappa}^2 = \eta_g N_{\partial}^2.$$

Так как можно считать, что η_g есть величина постоянная, то очевидно:

$$N_{\kappa}^{2/\kappa} = f(\sigma, n_{\partial}),$$

каковую функцию установить не трудно.

Предельная скорость электротепловоза по возбуждению V_{κ} определяется по формуле:

$$v_{\kappa} = A_g \eta_g \frac{n_{\partial}}{p_u},$$

где:

A_g — величина постоянная для динамомашины данного тепловоза,
 η_g — коэффициент полезного действия генератора, составляющий примерно 0,95.

Так как коэффициент η_g можно считать величиной постоянной и так как $p_u = f(\sigma)$, то очевидно.

$$V_{\kappa} = f(\sigma, n_{\partial}).$$

Таким образом в результате ограничение касательной силы тяги по генератору можно изобразить в виде функции:

$$Z_{\kappa}^{2/\kappa} = f(\sigma, n_{\partial}).$$

Если кривые

$$V_{\kappa} = f(\sigma, n_{\partial})$$

определены или найдены опытным путем, как это было сделано в отношении электротепловоза Э-Эл-2 (фиг. 5), то можно весьма просто графически построить кривую ограничения силы тяги по генератору Z_{κ}^2 на диаграммах дизельной силы тяги $Z_{\partial}^p = f(V)$ при разных наполнениях σ , составленных для разных чисел n_{∂} оборотов дизеля. Для этого надо только по диаграмме

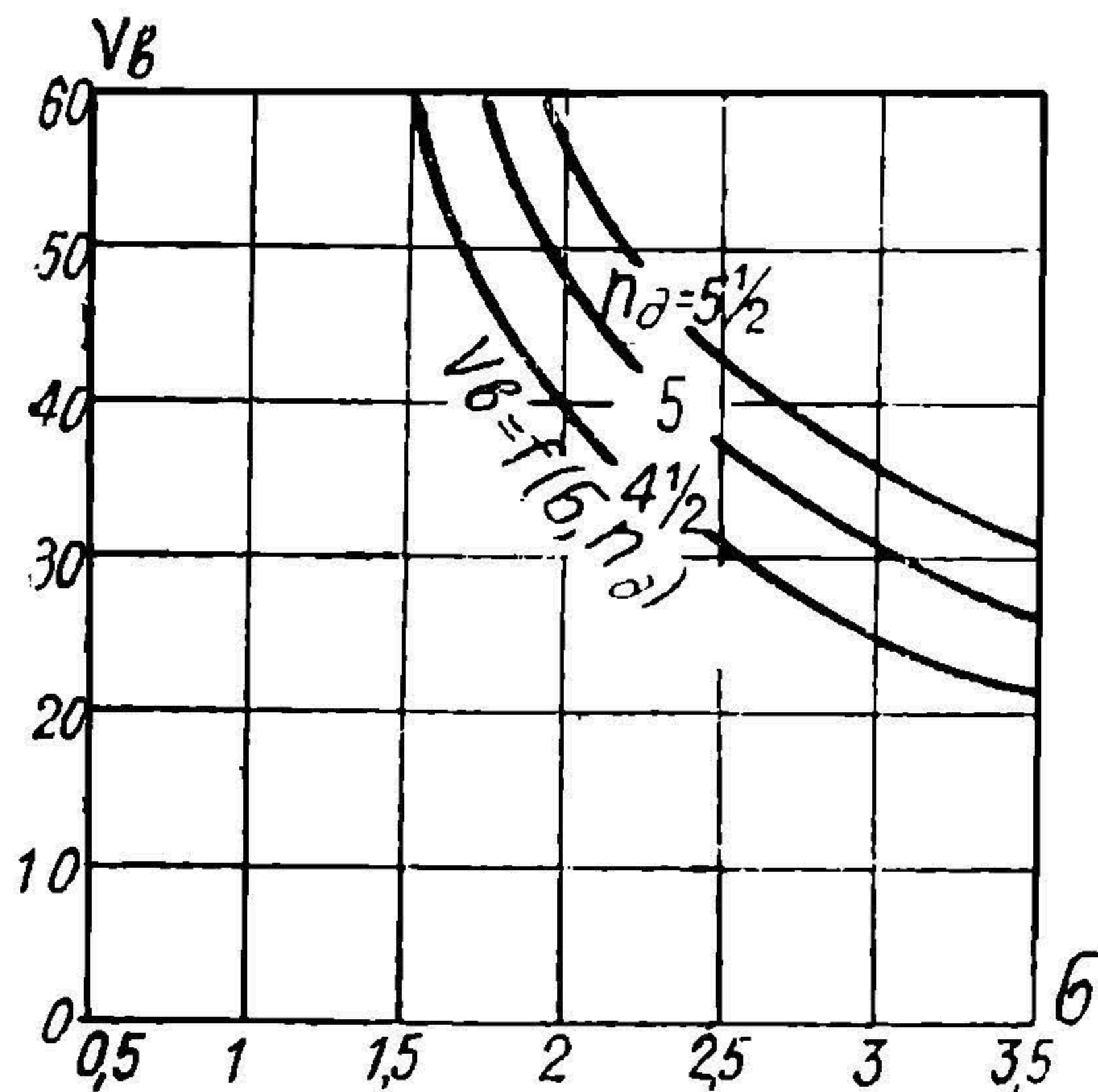
$$V_{\kappa} = f(\sigma, n_{\partial})$$

найти для определенного n_{∂} предельные скорости V_{κ} по возбуждению при разных σ и тогда на диаграмме $Z_{\partial}^p = f(V)$, отвечающей данному n_{∂} , из точек на оси V , отвечающих найденным V_{κ} , восстановить перпендикуляры до пересечения с кривыми $Z_{\partial}^p = f(V)$ для соответственных σ . Соединяя затем найденные точки пересечения плавной кривой, получаем кривую ограничения касательной силы тяги по генератору $Z_{\kappa}^2 = f(V)$ при данном числе n_{∂} оборотов дизеля.

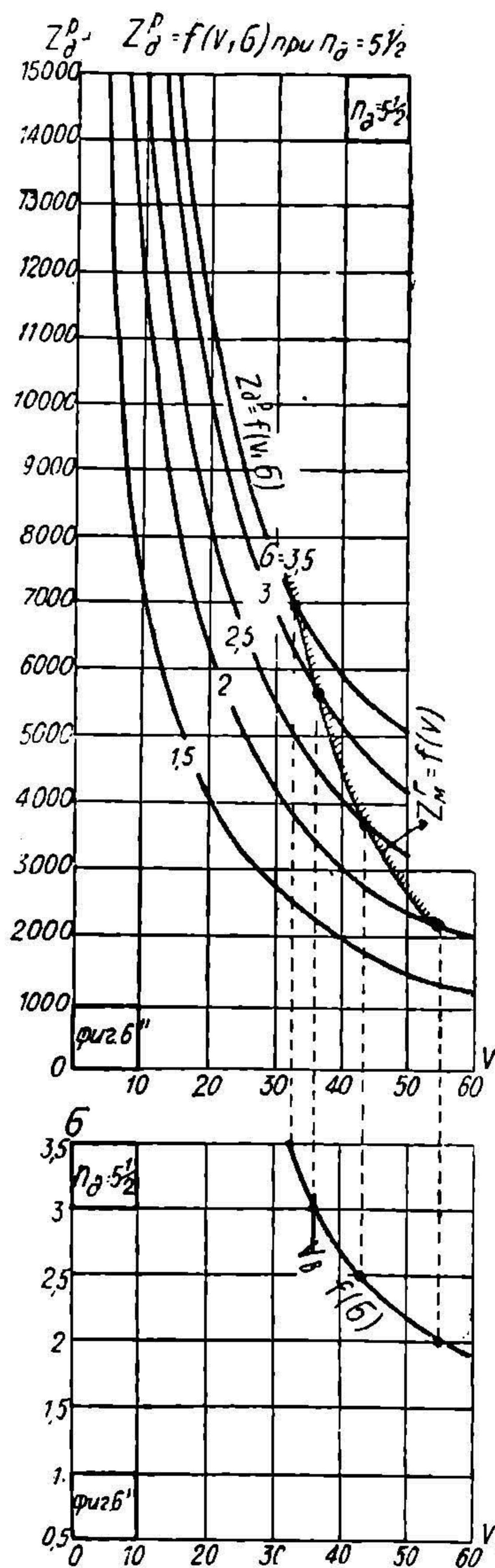
Указанного рода графическое построение кривой $Z_{\kappa}^2 = f(V)$ сделано на фиг. 6 в виде примера по отношению к электротепловозу

Э-Эл-2 при числе оборотов дизеля в секунду $n_d = 5,5$. Для этого первоначально на основании диаграммы $V_g = f(\sigma, n_d)$ (фиг. 5) на фиг. 6 построена в двойко повернутом (сперва влево на 90° , а затем вокруг оси ординат на 180°) виде кривая $V_g = f(\sigma)$ при $n_d = 5,5$. Остальное понятно из фиг. 6.

Надо заметить, что наличие ограничения силы тяги по генератору с тяговой точки зрения является некоторым, можно сказать, даже серьезным недостатком тепловоза Э-Эл-2 с электрической передачей, который заключается в том, что он не дает возможности при мало-мальски значительных скоростях использовать всю мощность дизеля, вернее сказать, в товарной службе заставляет при мало-мальски значительных скоростях держать большое число n_d оборотов дизеля, что далеко не всегда выгодно с точки зрения расхода топлива. В электротепловозе Э-ЭЛ-5 ограничение силы тяги по генератору (по возбуждению) как будто не имеет места.



Фиг. 5.



Фиг. 6.

б) Сила тяги по тяговым моторам ($Z_m^{т.м.}$)

§ 14. Суть ограничения силы тяги по тяговым моторам состоит в том, что моторы, в общем допускающие перегрузки, вызывающие нагрев их, не должны в результате настолько перегружаться, чтобы они нагревались свыше определенных предельных допустимых норм нагрева; при этом наиболее опасным для моторов является перегре-

вание обмоток, в которых выделяется наибольшее количество тепла по сравнению с остальными частями моторов. Поэтому предельные нормы нагревания моторов относятся к нагреванию обмоток.

Степень нагрева мотора, а следовательно, и его перегрева, определяющегося разностью τ между температурой якоря и температурой наружного воздуха при входе его в вентилятор, и зависит, с одной стороны, от силы тока в моторе, а с другой—от продолжительности его действия.

Поэтому сила тока в моторе, а следовательно мощность и сила тяги электротепловоза по тяговым моторам, обуславливается нормой допускаемого перегрева.

Из сказанного ясно, что при различной продолжительности действия тока в тяговых моторах могут быть использованы различные мощность и сила тяги электротепловоза.

В связи с этим различают:

а) „длительные“ (постоянные) мощность и силу тяги, могущие быть реализованными в течение достаточно продолжительного времени, при действии т. н. „длительного“ тока, т. е. тока, вызывающего за более или менее продолжительное время предельный допускаемый перегрев мотора (обмоток);

б) „часовые“ (нормальные) мощность и силу тяги, могущие быть реализованными в течение не больше одного часа, при действии „часового“ тока, т. е. тока, вызывающего в течение одного часа предельный допускаемый перегрев мотора. Очевидно, часовые мощность и сила тяги больше длительных, причем они тем больше приближаются к последним, чем интенсивнее примененная вентиляция: в моторах с автоматической вентиляцией отношение часовой мощности к длительной составляет 1,3—1,5, в современных же моторах с независимой вентиляцией—1,1—1,2;

в) „мгновенные“ (максимальные) мощность и сила тяги, могущие быть реализованными в течение минуты без каких-либо механических повреждений, остаточных деформаций и кругового огня на коллекторе; по нормам этого рода мощность должна в два раза быть больше часовой.

§ 15. Касательная сила тяги по тяговым моторам определяется по формуле:

$$Z_{\text{м}}^{\text{тм/к}} = m_{\text{тм}} \frac{270 \cdot \eta_{\text{тм+з}} E I_{\text{тм}}}{736 V} \quad (\text{кг}), *$$

где:

E —напряжение мотора (вольтаж);

$I_{\text{тм}}$ —сила тока в его обмотке (ампераж);

736—число ватт, которому равна л. с.;

$\eta_{\text{тм+з}}$ —коэффициент полезного действия тяговых моторов и зубчатой передачи $= \eta_{\text{тм}} \cdot \eta_{\text{з}}$, составляющий 0,85—0,90;

V —скорость движения тепловоза (км/ч);

$m_{\text{тм}}$ —число тяговых моторов.

Скорость движения электротепловоза может быть определена, исходя из следующего выражения, связывающего число $n_{\text{м}}$ оборотов

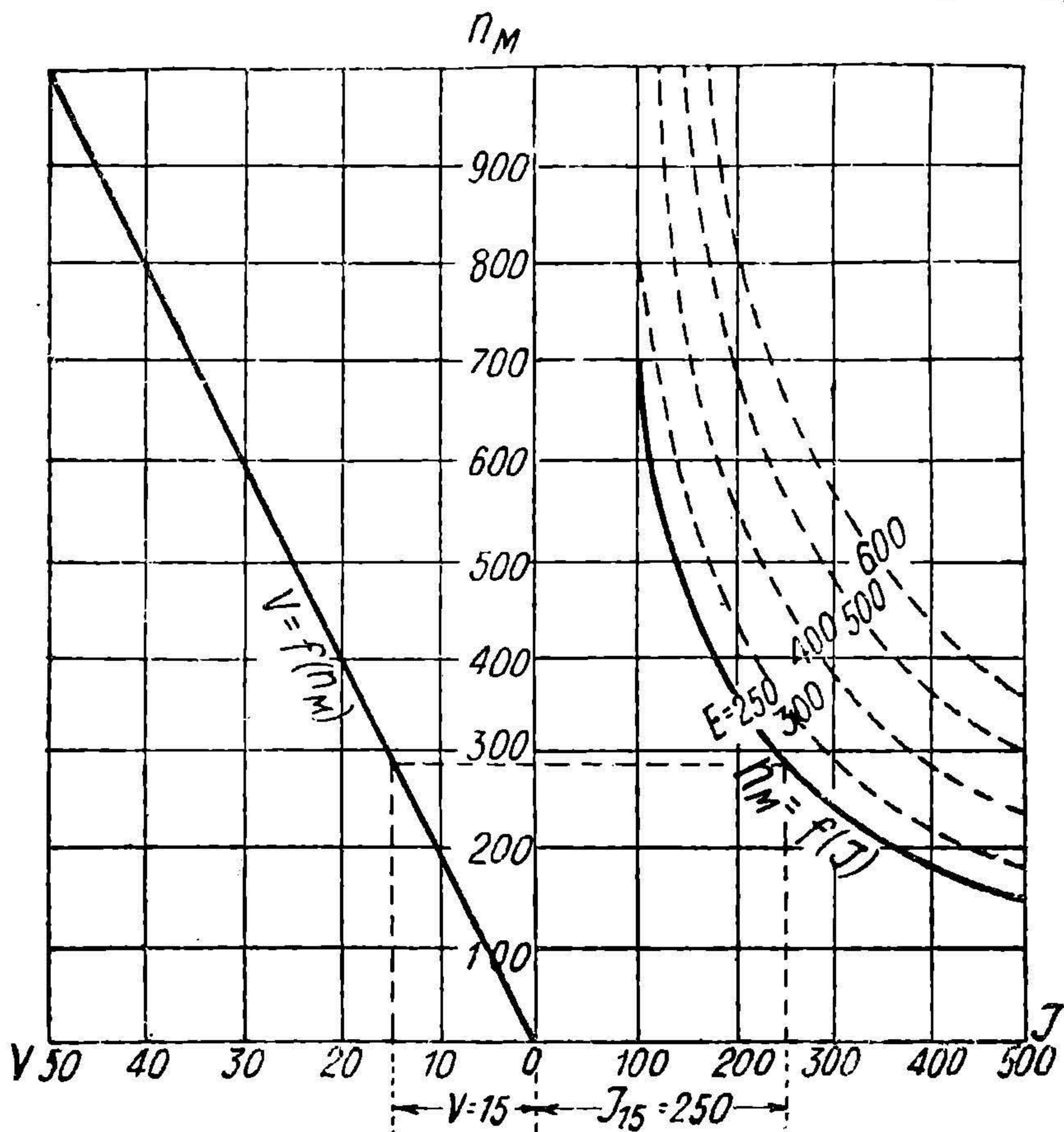
* См. сноску на стр. 26.

тяговых моторов в минуту и скорость тепловоза:

$$n_m = \frac{5,31 V}{\varphi D} *$$

Здесь:

φ — передаточное число (коэффициент передачи) $= \frac{n_{\kappa}}{n_m} = 1 : \frac{n_m}{n_{\kappa}}$ где



Фиг. 7.

* Зависимость между числом n_{κ} оборотов движущих колес в минуту и скоростью движения тепловоза V км/ч выражается так:

$$n_{\kappa} = \frac{1000 V}{\pi D^{(м)} 60} = 5,31 \frac{V}{D}$$

Следовательно:

$$\frac{n_{\kappa}}{n_m} = \varphi = 5,31 \frac{V}{D n_m}$$

Отсюда и получается:

$$n_m = 5,31 \frac{V}{\varphi D}$$

n_m —число оборотов движущих колес тепловоза в минуту,
 V —скорость движения тепловоза (км/ч);
 D —диаметр ведущих колес (м).
 Отсюда:

$$V = \frac{n_m \varphi D}{5,31} = 0,1884 n_m \varphi D.$$

На основании этой формулы, задаваясь какими-либо двумя значениями n_m , легко можно для данного тепловоза (данных φ и D) построить кривую $V = f(n_m)$, изображенную в левой части фиг. 7 (данная кривая построена для $\varphi = 1:4,6$ и $D = 1,22$ м, в общем по формуле $V = 0,05 n_m$).

Данные о напряжении E моторов, а также кривые зависимости числа n_m оборотов моторов от силы I_{tm} поглощаемого последним тока при разных E есть т. н. скоростная характеристика мотора

$$n_m = f(I_{tm})$$

даются заводом, изготовившим моторы.

Нанося скоростную характеристику мотора

$$n_m = f(I_{tm})$$

рядом с диаграммой

$$V = f(n_m).$$

(правая часть фиг. 7, где для примера сплошной линией нанесена одна кривая для некоторого заданного напряжения $E = 250$ в), получаем возможность легко определять силу тока I_{tm} , соответствующую любой интересующей нас скорости V (из фиг. 7 видно, что например при $E = 250$ в скорости $V = 15$ км/ч отвечает сила тока $I_{tm} = 250$ а) и, наоборот, определять скорость V , соответствующую любой интересующей нас силе тока I_{tm} .

Имея указанные данные, можно для заданного напряжения E определить кривую силу тяги по тяговым моторам $Z_m^{tm} = f(V)$ по приведенной выше формуле. Для этого надо лишь задаться рядом скоростей $V = 10, 20, 30 \dots$, найти для этих скоростей по диаграмме фиг. 7 соответствующие силы тока I_{tm} и затем подставить все эти данные в формулу для Z_m^{tm} . Этим способом и построены кривые силы тяги по тяговым моторам взятого в качестве примера тепловоза при разных напряжениях E , показанные на фиг. 8.

Интересующими нас в электротепловозе кривыми силы тяги по тяговым моторам являются верхний и нижний пределы ее, отвечающие часовому и длительному току данных моторов и являющиеся в результате ограничением силы тяги электротепловоза. Очевидно, ограничение силы тяги по моторам имеет реальный смысл при наименьшем напряжении моторов ($E = \min$).

Из сказанного выше понятно, что названные верхний и нижний пределы силы тяги по моторам $Z_m^{tm/чс}$ и $Z_m^{tm/дл}$ при часовом и длительном токах, величины которых даются заводами, строящими данные моторы, определяются следующим образом.

Имея соответствующую диаграмму по фиг. 7, на которой имеется кривая $n_m = f(\min E)$, находят скорости $V^{чс}$ и $V^{дл}$, отвечающие соответственно часовому току $I_{tm}^{чс}$ и длительному $I_{tm}^{дл}$.

Тогда искомые пределы (ограничения) силы тяги, очевидно, определяются по формулам:

$$Z_{\text{м}}^{\text{т.м/чс}} = m_{\text{т.м}} \frac{270 \cdot \eta_{\text{т.м+в}} \min EI_{\text{т.м}}^{\text{чс}}}{736 V^{\text{чс}}}$$

$$Z_{\text{м}}^{\text{т.м/дл}} = m_{\text{т.м}} \frac{270 \cdot \eta_{\text{т.м+в}} \min EI_{\text{т.м}}^{\text{дл}}}{736 V^{\text{дл}}},$$

где $m_{\text{т.м}}$, как было указано выше, — число тяговых моторов.

Пусть например имеем заданными $\min E = 250$ в, $I_{\text{т.м}}^{\text{чс}} = 360$ а, а $I_{\text{т.м}}^{\text{дл}} = 320$ а., и предположим, что диаграмма на фиг. 7 отвечает рассматриваемому тепловозу, т. е. кривая $V = f(n_{\text{м}})$ отвечает величинам φ и D данного тепловоза, а сплошная кривая $n_{\text{м}} = f(I)$ — данному $\min E = 250$ в.

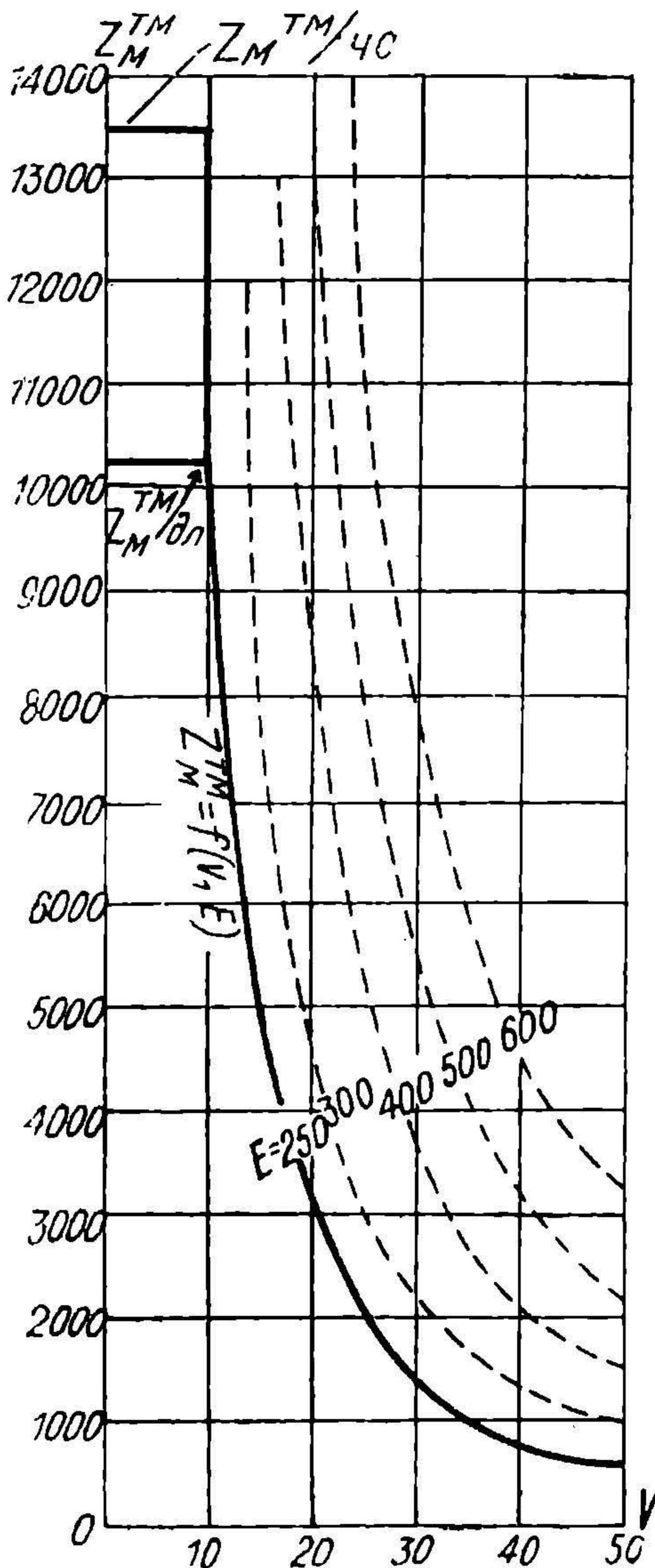
Тогда находим по этой диаграмме, что часовому току $I_{\text{м}}^{\text{чс}} = 360$ а соответствует скорость $V^{\text{чс}} = 10$ км/ч, а длительному току $I_{\text{т.м}}^{\text{дл}} = 320$ а — скорость $V^{\text{дл}} = 12$ км/ч. Пусть число тяговых моторов $m_{\text{т.м}} = 5$, а коэф. $\eta_{\text{т.м+в}} = 0,85$ (принимая его постоянной величиной).

Тогда ограничения силы тяги получаем:

$$Z_{\text{м}}^{\text{т.м/чс}} = 5 \frac{270 \cdot 0,85 \cdot 250 \cdot 360}{736 \cdot 10} = 13\,500 \text{ кг.}$$

$$Z_{\text{м}}^{\text{т.м/дл}} = 5 \frac{270 \cdot 0,85 \cdot 250 \cdot 320}{736 \cdot 12} = 10\,200 \text{ кг.}$$

Эти ограничения и нанесены на сплошную кривую силу тяги по фиг. 8, каковая кривая представляет собой, как указано было выше, кривую силы тяги $Z_{\text{м}}^{\text{т.м}} = f(V)$ данного электротепловоза при заданном напряжении $E = 250$ в.



Фиг. 8.

3. Сцепная сила тяги (Z_c)

§ 16. Касательная сцепная сила тяги всякого тепловоза, как и паровоза (вообще всякого локомотива), определяется из условия, что сумма касательных усилий тяги на ведущие оси не может быть больше силы сцепления названных колес с рельсами, т. е:

$$\sum Z^* \leq 1\,000 \psi P_m^c \text{ (кг).}$$

Здесь:

P_m^c —сцепной вес тепловоза (часть полного веса, приходящаяся на ведущие оси);

ψ —коэффициент сцепления, который, как известно, $= \frac{f_0}{\mu}$, где f_0 —коэффициент трения первого рода при скорости, равной нулю, а μ —отношение суммы наибольших в течение полного оборота колес касательных усилий на колеса ΣZ^{max} к сумме средних такого же рода усилий ΣZ^{cp} :

$$\left(\mu = \frac{\Sigma Z^{max}}{\Sigma Z^{cp}} = 1 + \frac{\Sigma Z^{max} - \Sigma Z^{cp}}{\Sigma Z^{cp}} \right),$$

в общем коэффициент, учитывающий неравномерность вращающего момента за полный оборот колес.

В тепловозах о сумме названных усилий и неравномерности вращающего момента приходится говорить тогда, когда передаточный механизм тепловоза такой системы, что ведущие оси спарены, как в паровозах. Это имеет место в тепловозах при компрессорной передаче работы от двигателя к колесам, а также при электрической передаче в случае наличия не на каждой оси индивидуальных тяговых моторов, а одного или двух укрупненных тяговых моторов, работающих на отбойный вал, от которого движение всем осям тепловоза и передается при помощи шатунов и спарников. В тепловозах же с электрической передачей при помощи одного или двух индивидуальных, независимых моторов на каждой оси и с передачами жесткой или гидравлической, так же как и в электровозах, указанный вопрос отпадает. Вследствие отсутствия в данном случае шатунов и спарников величина вращающего момента (равномерного), а следовательно, и суммы касательных усилий (равномерно распределенных), является величиной постоянной, т. е.:

$$\Sigma Z^* = \text{const} = Z_c^*,$$

а потому, очевидно:

$$\mu = 1$$

и следовательно

$$\psi = f_0,$$

т. е. в данном случае коэффициент сцепления равен коэффициенту трения при скорости, равной нулю.

Зато в данном случае, так как возможно боксование колес отдельных осей (в тепловозах со спарниками, как и в паровозах, это невозможно), для каждой оси отдельно должно быть соблюдено условие:

$$Z^* \leq f_0 \min 2P_k^d,$$

где $2P_k^d$ —сумма динамических нагрузок на оба колеса данной оси.

При этом в виду отсутствия противовесов и шатунов для электротепловозов с люлечным подвешиванием моторов $\min P_k^d$ выражается так:

$$\min P_k^d = P_k^c - r_{n.p} \cdot m_{n.p} - a \cdot r_{a.p} \cdot m_{a.p},$$

где:

P_k^c —статическая нагрузка на колесо (кг),

$r_{н.р}$ и $r_{л.р}$ — жесткость соответственно подвесных и люлечных рессор (в тепловозе Э-Эл-2 соответственно 110 и 115 кг/мм;

$m_{н.р}$ и $m_{л.р}$ — игра соответственно подвесных и люлечных рессор (в тепловозе Э-Эл-2 соответственно 15 и 20 мм);

a — доля веса тяговых моторов, передающаяся люлечным рессорам (в тепловозе Э-Эл-2 — 0,46).

Ясно, что тепловозы, у которых отсутствуют спарники, находятся в смысле сцепления колес с рельсами в более неблагоприятных условиях, чем тепловозы со спарниками, очевидно, чем и паровозы.

В заключение надо отметить, что для тепловозов с электрической передачей при отсутствии спарников коэффициент сцепления ψ , равный в данном случае коэффициенту трения f_0 , может определяться по формуле:

$$f_0 = K - 0,00125 V,$$

введенной на основании опытов с электровозами германских и австрийских железных дорог, произведенных Müller'ом и Wichert'ом для различных скоростей и условий работы электровоза.

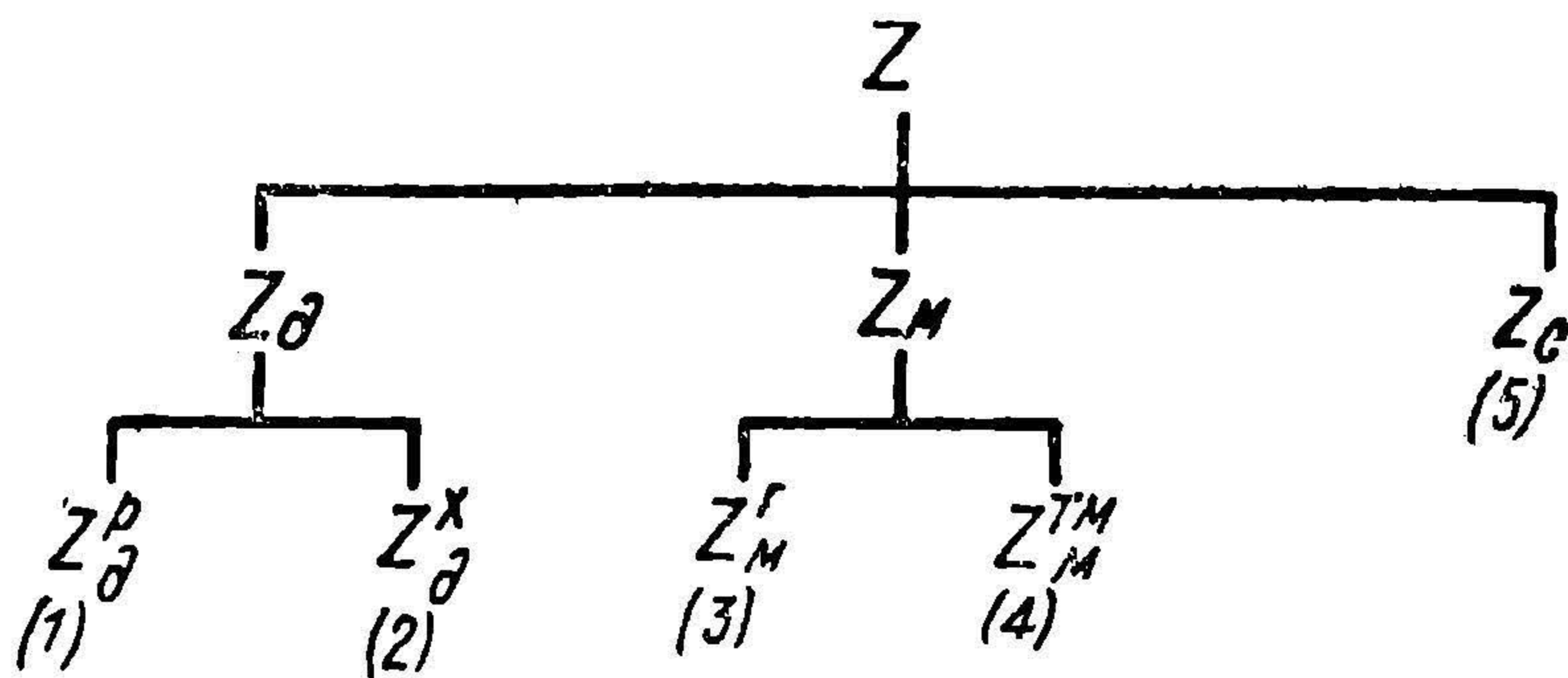
Здесь K обозначает коэффициент, зависящий от состояния поверхности рельсов и равный для сухих, чистых рельсов 0,28, для сырых, грязных рельсов — $0,7 \cdot 0,28 = 0,20$, наконец для скользких рельсов $0,4 \cdot 0,28 = 0,11$.

Нормальное ограничение силы тяги по сцеплению целесообразно определять для среднего из указанных случаев состояния поверхности рельсов, т. е. для сырых, грязных рельсов.

Для электротепловоза Э-Эл-2 на основании опытных данных коэффициент сцепления был определен в $1/6,1$. Такое сравнительно малое значение коэффициента сцепления получилось отчасти вследствие отсутствия в данном тепловозе спарников.

4. Общее ограничение силы тяги

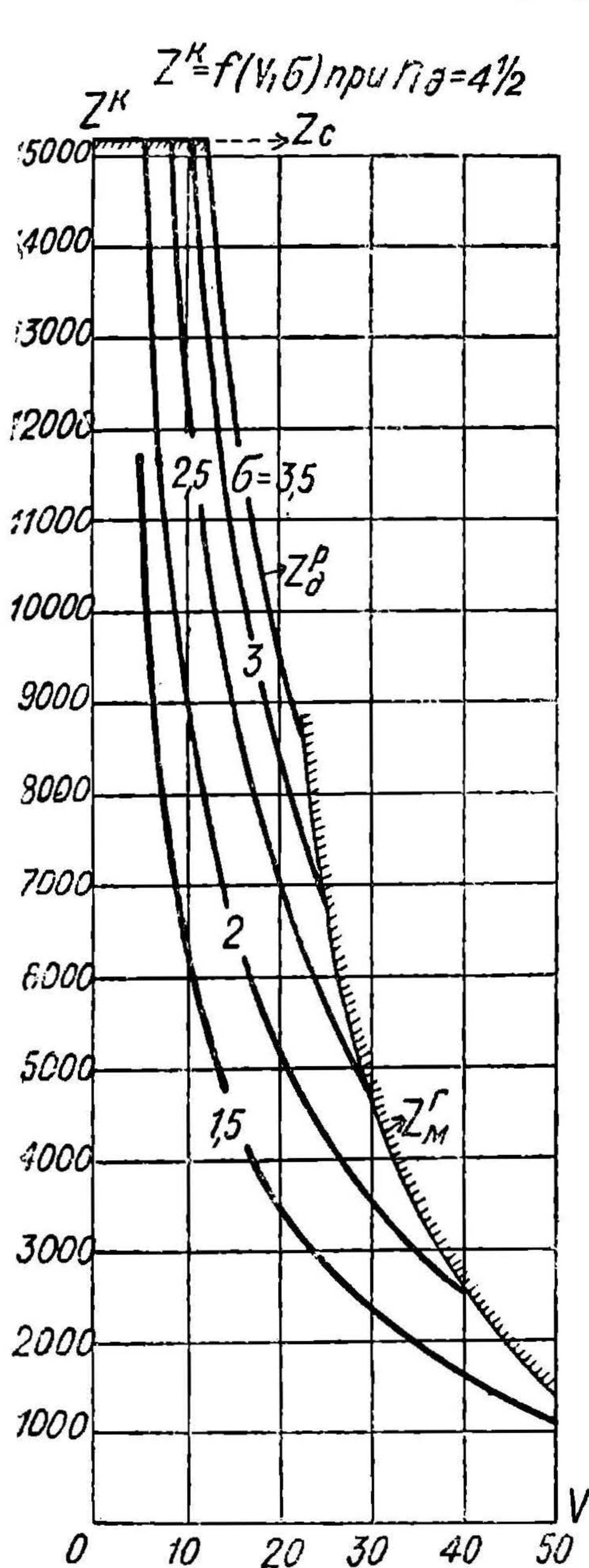
§ 17. Из сказанного выше видно, что в общем сила тяги электротепловоза при каждом числе n_d оборотов дизеля может иметь пять ограничений, показанных в виде следующей схемы (фиг. 9).



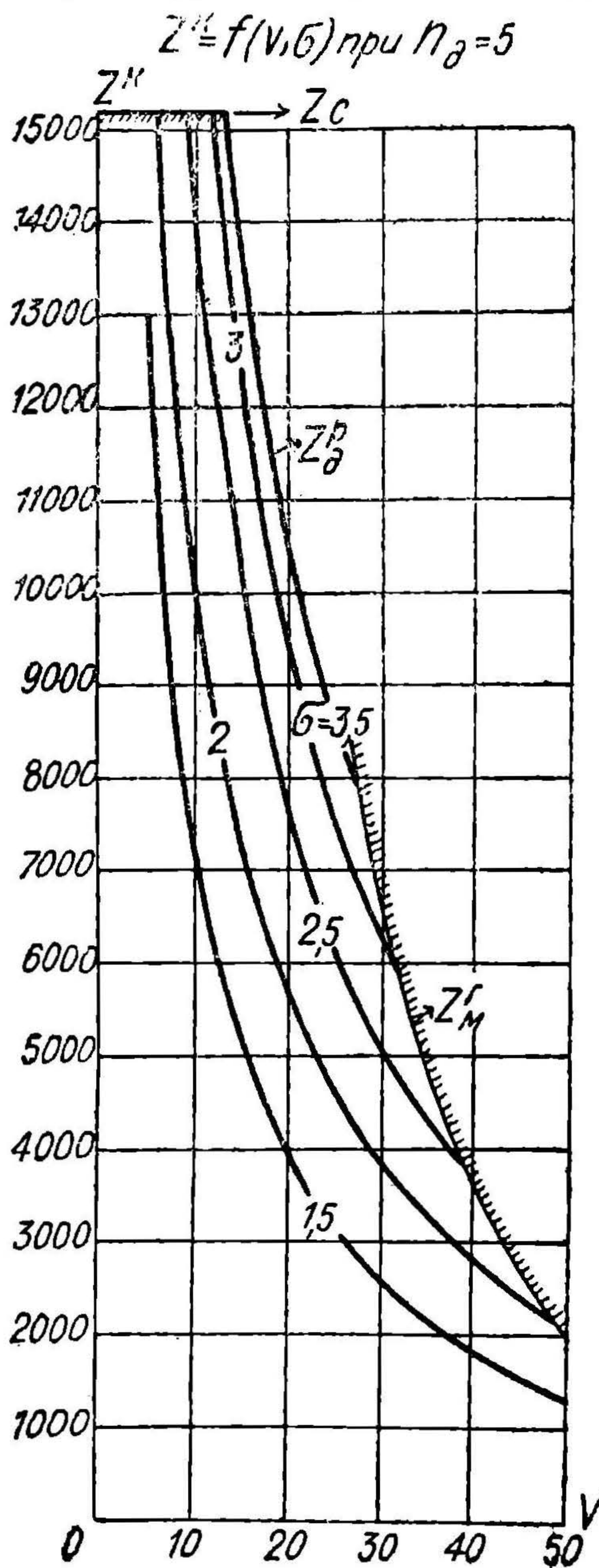
Фиг. 9.

Желая получить общее ограничение силы тяги при каком-либо числе n_d оборотов дизеля в секунду, необходимо прежде всего из двух величин дизельной силы тяги Z_d^p и Z_d^x выбрать меньшую, которая и будет ограничением силы тяги по дизелю (Z_d), и затем из двух величин машинной силы тяги Z_m^r и Z_m^{tm} тоже выбрать меньшую, кото-

рая будет ограничением силы тяги по машине (Z_M). Тогда на основании частных ограничений Z_0 , Z_M и Z_0 не трудно получить и общее



Фиг. 10.



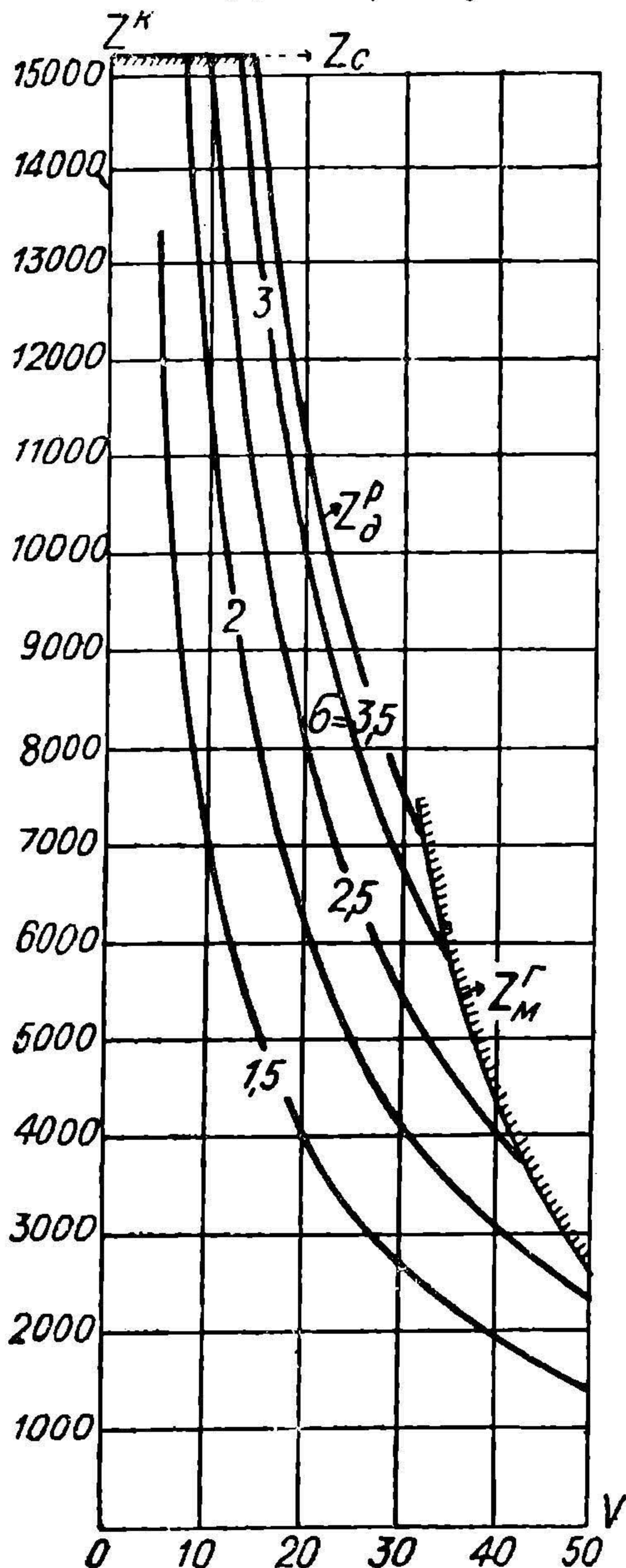
Фиг. 11.

ограничение силы тяги при данном числе n_d оборотов дизеля, т. е. кривые $Z'' = f(V)$ для разных наполнений σ .

Такого рода кривые при $n_d = 4,5—5$ и $5,5$ для касательной силы тяги электротепловоза Э-Эл-2 представлены на фиг. 10, 11 и 12.

На этих диаграммах кривые ограничения по дизелю представляют собой ограничение по режиму дизеля, как ограничение для данного тепловоза большее, чем ограничения по холодильнику (§ 11) ($Z_d^x > Z_d^p$,

$$Z^k = f(V, b) \text{ при } n_d = 5\frac{1}{2}$$

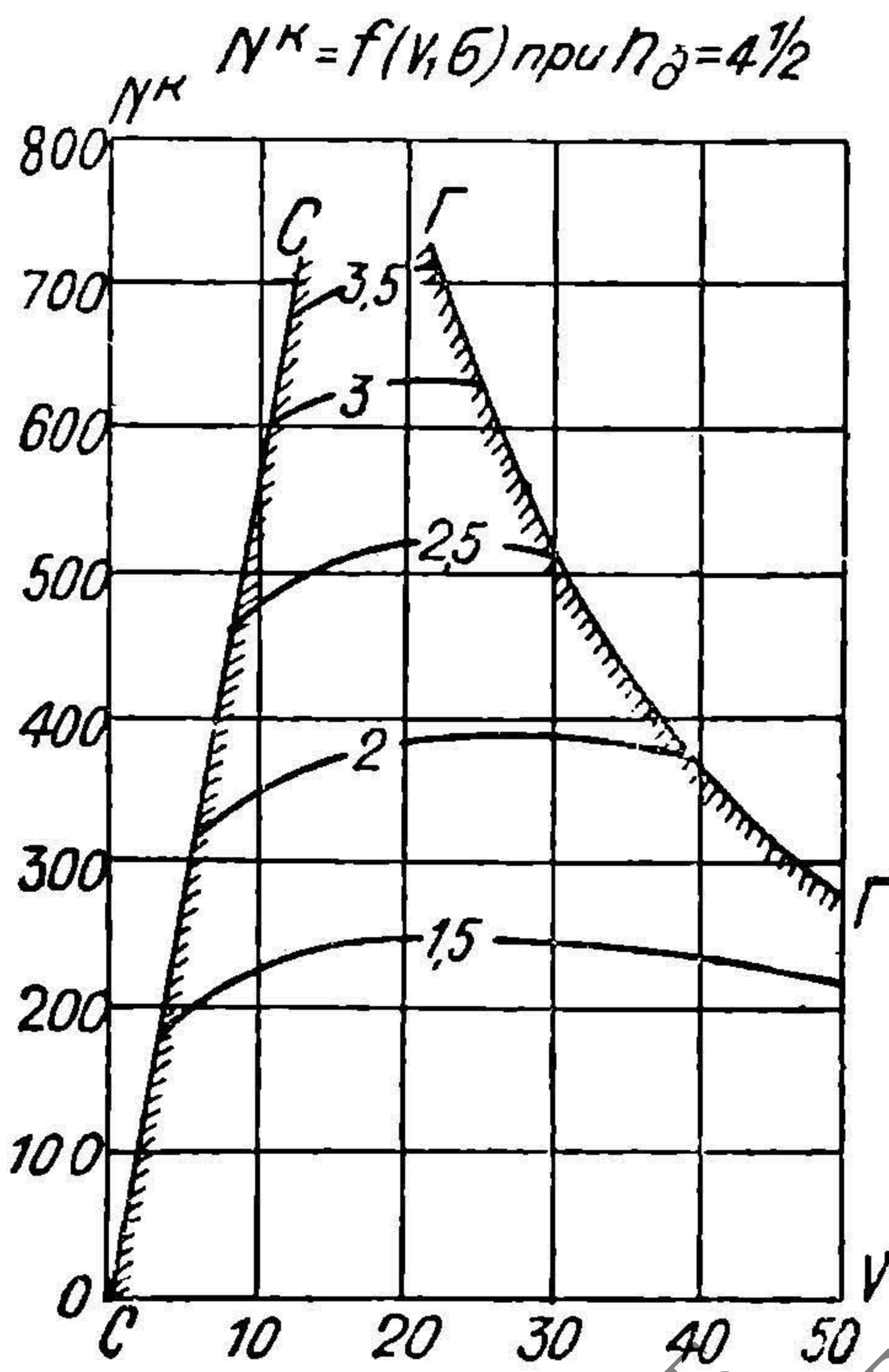


Фиг. 12.

а кривые ограничения по машине—ограничения по генератору, как ограничение большее, чем ограничение по тяговым моторам ($Z_m^{mm} > Z_m^z$).

Параллельно этим кривым $Z^k = f(V, \sigma, n_d)$ на фиг. 13, 14 и 15 приведены для $n_d = 4,5—5$ и $5,5$ кривые касательной мощности названного электротепловоза, на которых левые, подштрихованные кривые представляют собой ограничение мощности по сцеплению (C), а правые, подобного же рода кривые—ограничение по возбуждению (Г).

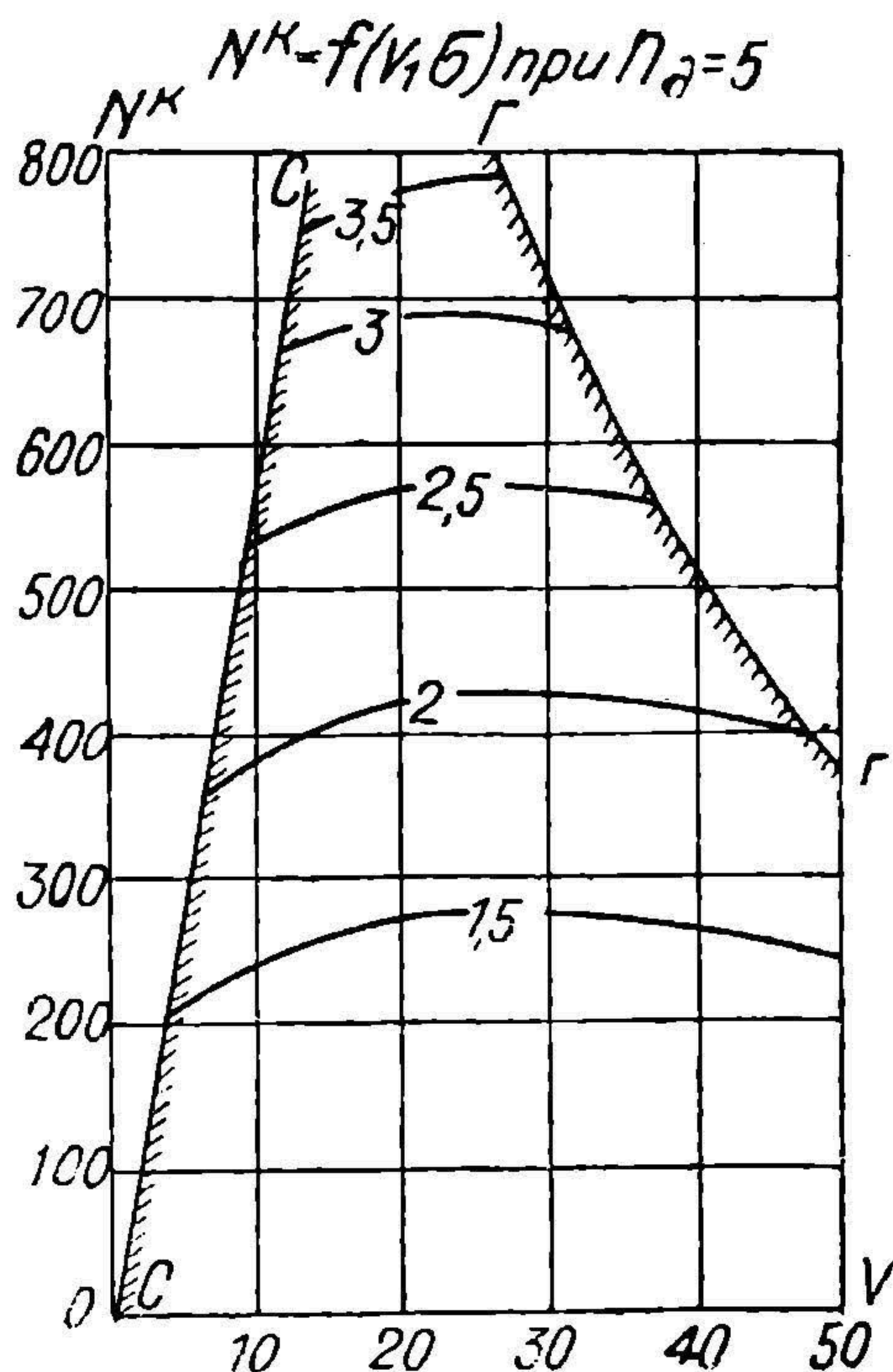
На приведенных диаграммах кривых силы тяги Z^k , а особенно



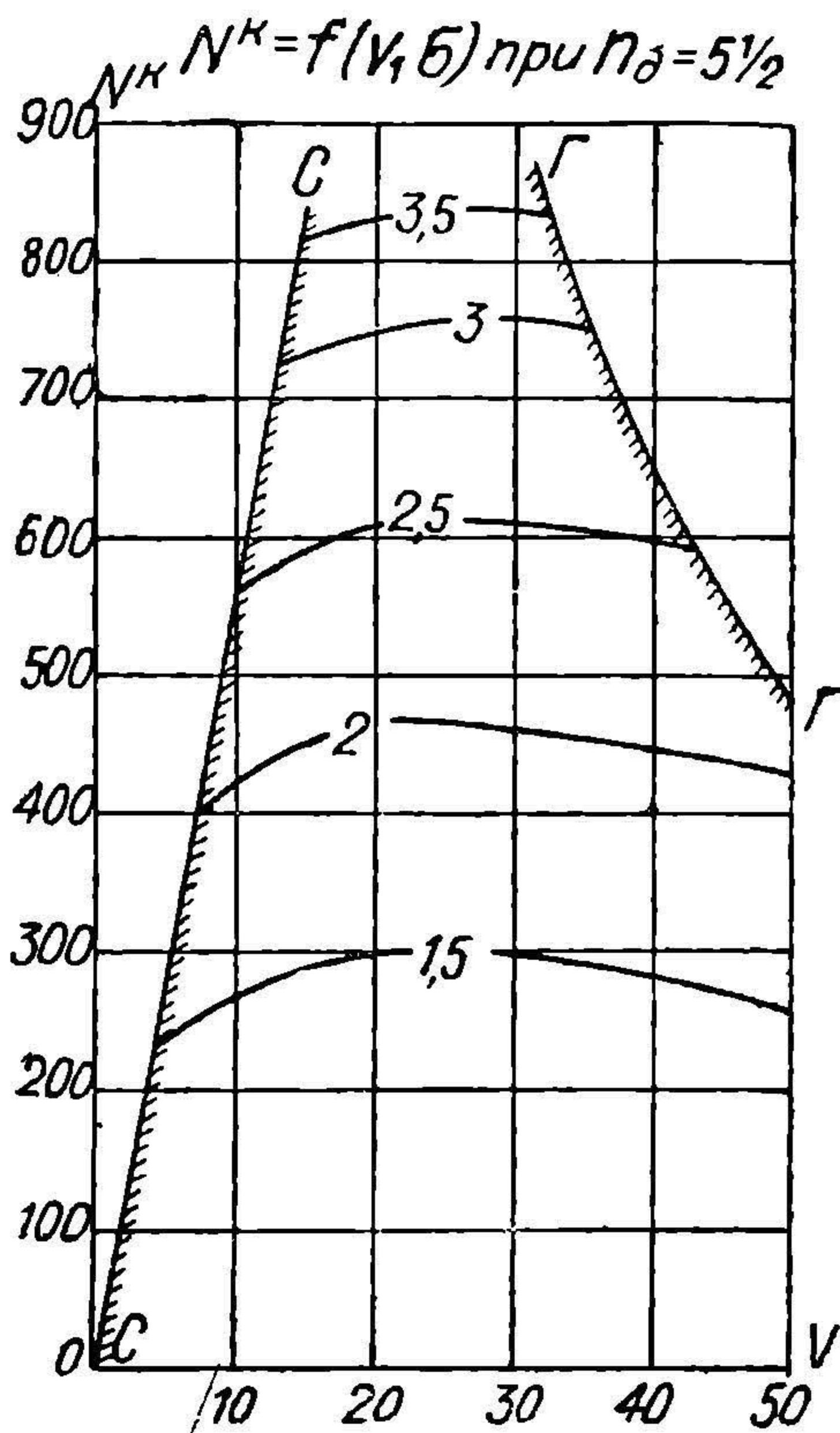
Фиг. 13.

выпукло на диаграммах мощности N^k , выступает эксплуатационное значение ограничений силы тяги данного электротепловоза по сцеп-

лению и генератору. Как видно, благодаря этим ограничениям максимальную форсировку дизеля $\sigma = 3,5$ можно реализовать далеко не при всех скоростях, иначе говоря, в электротепловозе Э-Эл-2 мощность дизеля можно использовать только в сравнительно тесных пределах скоростей: при $n_d = \max = 5,5$ между скоростями 14 и 32 км/ч, а при $n_d = 4,5$ еще в более тесных пределах, — между скоростями 12 и 22 км/ч. Это является, надо заметить, иногда главным недостатком



Фиг. 14.



Фиг. 15.

электрической передачи, делающей ее трудноприменимой к пассажирским тепловозам.

III. Расход топлива электротепловозом

§ 18. При тепловозной тяге вопрос расхода тепловозом топлива является совершенно самостоятельным вопросом, а не вопросом, связанным с расходом воды, как это имеет место при паровозной тяге: расход воды при тепловозной тяге настолько ничтожный, что не составляет вообще вопроса.

Полный расход B топлива тепловозом складывается: а) из основного расхода B_d , — расхода топлива дизелем (главным двигателем) и б) из дополнительного расхода $B_{дон}$, — расхода двигателем холодильника, расходов, связанных с некоторыми неправильностями в регулировании во

время поездок топливных насосов, расходов на работу дизеля при стоянках или при движении под уклон (например для подкачки свисткового и тормозного воздуха) и др., так что в общем:

$$B = B_{\partial} + B_{\partial \text{оп.}}$$

§ 19. Расход B_{∂} топлива главным двигателем может быть определен следующим образом. Зависимость между часовым расходом

топлива $B_{\partial/\text{ч}}$ четырехтактным двигателем и форсировкой (наполнением) σ может быть, очевидно, выражена так:

$$B_{\partial/\text{ч}} = \frac{60 m_{\text{ц}} n_{\partial} \sigma}{2 \cdot 1000} = 1,8 m_{\text{ц}} n_{\partial} \sigma \text{ (кг/ч)},$$

где все буквы имеют свои прежние значения:

$m_{\text{ц}}$ — число цилиндров двигателя;

n_{∂} — число оборотов двигателя в секунду,

σ — форсировка, т. е. наполнение (σ).

Коэффициенты же означают:

60^2 — переход от секунд к часам,

1000 — переход от граммов к килограммам,

2 — характеристику четырехтактного двигателя (рабочий ход имеется один на два оборота двигателя, см. стр. 19).

Ясно, что для определенного двигателя:

$$B_{\partial/\text{ч}} = A n_{\partial} \sigma = f(n_{\partial}, \sigma),$$

где A — постоянная величина = $1,8 m_{\text{ц}}$ (для электротепловоза Э-Эл-2, у которого $m_{\text{ц}} = 6$, $A = 10,8$), и, следовательно, задаваясь определенным числом n_{∂} оборотов дизеля, можно найти функцию:

$$B_{\partial/\text{ч}} = f(\sigma).$$

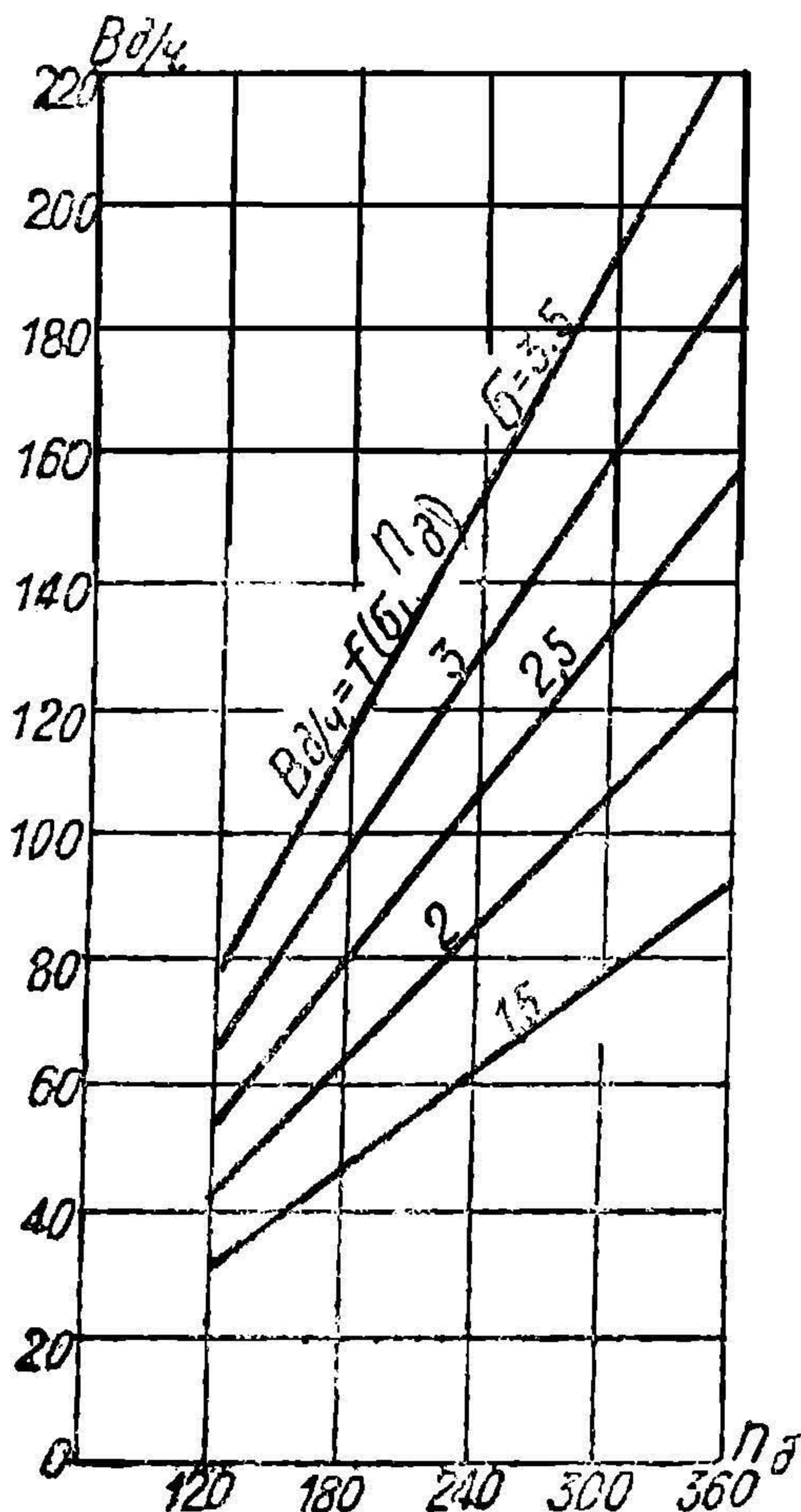
На фиг. 16 приведена для электротепловоза Э-Эл-2 диаграмма

$$B_{\partial/\text{ч}} = f(n_{\partial}, \sigma).$$

Для определения часового расхода топлива $B_{\partial/\text{ч}}$ на каком-либо элементе пути необходимо знать функцию:

$$B_{\partial/\text{ч}} = f(i_{\phi}),$$

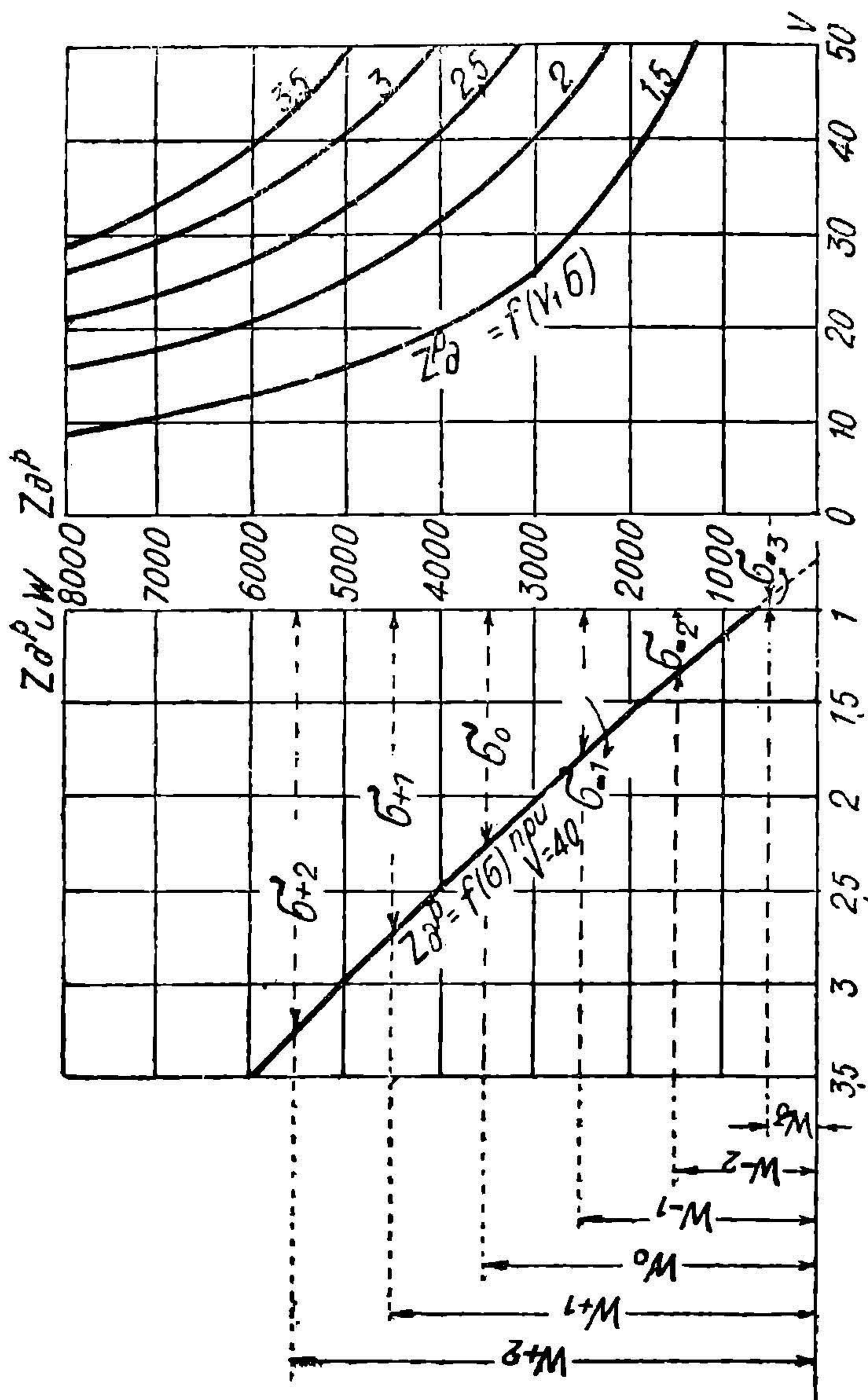
где i_{ϕ} — фиктивный уклон данного элемента в ‰, а для этого, как видно, надо знать функцию:



Фиг. 16.

$$\sigma = f_1(l_\phi).$$

Эта последняя, надо заметить, может быть определена способом, вполне аналогичным тому, которым при паровозной тяге опреде-



Фиг. 17.

ляется зависимость форсировки котла u_m от фиктивных уклонов, т. е. функция:

$$u_m = f(i_\phi).$$

Если известна зависимость:

$$B_{\partial/\phi} = f(i_\phi),$$

то не трудно найти расход топлива на каком-либо элементе рассматриваемого участка, имеющем известные длину l (км) и фиктивный

уклон i_ϕ , если известна расчетная скорость движения поезда на данном уклоне.

Очевидно, время прохода поездом 1 км элемента с данным уклоном i_ϕ составляет:

$$t_{км} = \frac{60}{V} \text{ (мин)},$$

а расход топлива в минуту:

$$B_{д/м} = \frac{B_{д/ч}}{60} \text{ (кг/мин)}.$$

Следовательно расход топлива дизелем на протяжении 1 км данного элемента будет:

$$B_{д/км} = B_{д/м} \cdot t_{км} = \frac{B_{д/ч}}{60} \cdot \frac{60}{V} = \frac{B_{д/ч}}{V} \text{ (кг/км)},$$

на протяжении же всей его длины l (км):

$$B_{д/l} = B_{д/км} \cdot l = \frac{B_{д/ч}}{V} \cdot l \text{ (кг)}.$$

Наконец на протяжении всего участка, имеющего n элементов, расход B_d топлива дизелем определится из выражения:

$$B_d = \sum_1^n \frac{B_{д/ч}}{V} l_n \text{ (кг)}.$$

§ 20. Сказанное полезно пояснить следующим примером.

Положим, требуется определить расход топлива на 1 км протяжения фиктивных уклонов от $+7\text{‰}$ до -7‰ поездом весом $Q = 1000 \text{ т}$, ведомым электротепловозом Э-Эл-2 весом 125 т , при числе оборотов двигателя $n_d = 5,5$.

Пусть наибольшая скорость поезда под током $\max V = 40 \text{ км/ч}$. Прежде всего на основании фиг. 12 строим нижнюю половину диаграммы силы тяги $Z_d^p = f(V, \sigma)$ при $n_d = 5,5$ (фиг. 17, правая часть) и по ней строим кривую:

$$Z_d^p = f(\sigma)$$

при постоянной скорости $V = 40 \text{ км/ч}$ (фиг. 17, левая часть).

Затем определяем при $V = 40 \text{ км/ч}$ общие полные сопротивления данного поезда на площадке и фиктивных уклонах, принимая основное удельное сопротивление для поезда в целом, например по формуле Baldwin'a:

$$W_0 = 1,5 + 0,05 V = 1,5 + 0,05 \cdot 40 = 3,5 \text{ кг/т}.$$

Тогда общие полные сопротивления поезда получаем следующие:

на площадке:	W_0	$= 3,5 + 1000 = 3500 \text{ кг}$
„ подъеме +1:	W_{+1}	$= 3500 + 1000 = 4500 \text{ „}$
„ „ +2:	W_{+2}	$= 4500 + 1000 = 5500 \text{ „}$
„ скате -1:	W_{-1}	$= 3500 - 1000 = 2500 \text{ „}$
„ „ -2:	W_{-2}	$= 2500 - 1000 = 1500 \text{ „}$
„ „ -3:	W_{-3}	$= 1500 - 1000 = 500 \text{ „}$
„ „ -4:	W_{-4}	$= 500 - 1000 = -500 \text{ „}$

Так как при установившемся движении $Z = W$, то, превратив ось Z в ось W , откладываем на последней полученные величины и

через полученные точки проводим горизонтальные прямые (на фиг. 17 — пунктирные) до пересечения их с кривой:

$$Z_{\sigma}^p = f(\sigma) \text{ при } V = 40 \text{ км/ч.}$$

Полученные (по масштабу) абсциссы:

$$\begin{aligned}\sigma_{+2} &= 3,25 \text{ г} \\ \sigma_{+1} &= 2,75 \\ \sigma_0 &= 2,25 \text{ " } \\ \sigma_{-1} &= 1,75 \text{ " } \\ \sigma_{-2} &= 1,30 \text{ " } \\ \sigma_{-3} &= 0,90 \text{ " }\end{aligned}$$

представляют собой величины форсировок (наполнений) на площадке и на некоторых фиктивных уклонах и, следовательно, они дают возможность построить кривую (фиг. 18):

$$\sigma = f(i_{\phi}).$$

К полученным точкам этой кривой необходимо добавить еще одну точку, а именно ту, которая отвечает скату i_{ϕ} , для которого $\sigma = 0$, т. е. скату, по которому поезд будет идти с тах $V = 40 \text{ км/ч}$ без расхода тока, следовательно, и топлива. Этот скат найдем из выражения:

$$-i_{\phi}^{\sigma=0} = \frac{w_0^{\text{эм}} (\pi + m/\delta \cdot m) P_{\text{эм}} + w_0^g P_g}{Q}.$$

Величину $w_0^{\text{эм}} (\pi + m/\delta \cdot m)$ определяем по приведенной в разделе I формуле Успенского:

$$w_0^{\text{эм}} (\pi + m/\delta \cdot m) = 3,1 + 0,0014 V^2 = 3,1 + 0,0014 \cdot 40^2 = 5,34 \text{ кг/т},$$

а величину w_0^g принимаем по прежнему $= 3,5 \text{ кг/т}$.

Тогда получаем:

$$-i_{\phi}^{\sigma=0} = \frac{5,34 \cdot 125 + 3,5 \cdot 875}{1000} = 3,7\text{‰}.$$

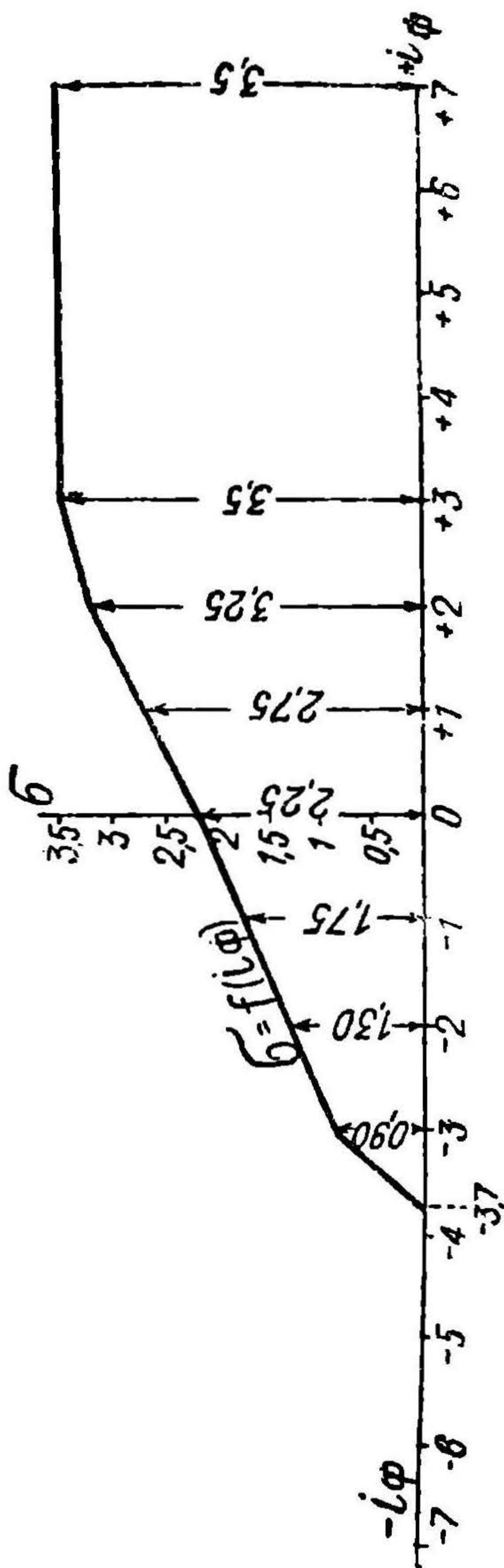
Следовательно, на всех скатах $-i_{\phi} \geq 3,7\text{‰}$ форсировка $\sigma = 0$.

Очевидно, что на всех подъемах $+i_{\phi} \geq 3\text{‰}$ форсировка $\sigma = \text{тах } \sigma = 3,5 \text{ г}$.

Теперь не трудно определить часовой расход топлива по указанной выше формуле:

$$B_{\text{д/ч}} = A \cdot n_{\phi} \sigma = 10,8 \cdot 5,5 \cdot \sigma = 59,4\sigma \text{ (кг/ч)},$$

а зная расчетные скорости на интересующих нас уклонах, не трудно



Фиг. 18.

определить и искомые покилометровые расходы топлива на этих уклонах по формуле:

$$B_{\partial/\text{км}} = \frac{B_{\partial/\text{ч}}}{V} \text{ (кг/км)}.$$

Расчеты эти сведены в следующей таблице:

i_{ϕ}	V км/ч	σ %	$B_{\partial/\text{ч}}$ кг	$B_{\partial/\text{км}}$ кг
+7	17,0	3,5	208	12,23
+6	18,8	3,5	208	11,06
+5	20,7	3,5	208	10,05
+4	23,5	3,5	208	8,89
+3	26,4	3,5	208	7,90
+2	28,3	3,25	193	6,82
+1	31,6	2,75	163	5,16
0	33,0	2,25	134	4,06
—1	35,5	1,75	104	2,93
—2	34,4	1,30	77	2,06
—3	39,3	0,90	53	1,35
—3,7	40,0	0	0	0

§ 21. К полученным величинам $B_{\partial/\text{км}}$ основного расхода топлива,—расхода главным двигателем,—надо, как это понятно из сказанного в самом начале настоящего раздела, прибавить еще некоторые дополнительные расходы $B_{\partial_{\text{от}}}$ топлива,—расход двигателем холодильника, расходы, связанные с некоторыми неправильностями в регулировании во время поездок топливных насосов и др. Величины $B_{\partial_{\text{от}}}$ безразлично, представляют ли они собой часовые или покилометровые расходы, могут быть оцениваемы, имея в виду правильную работу вентилятора, в размере примерно 7—10% расхода топлива B_{∂} главным двигателем.

Таким образом в общем полный расход топлива тепловозом может определяться по формуле:

$$B = B_{\partial} + B_{\partial_{\text{от}}} = (1 + \beta) B_{\partial},$$

где $\beta = 0,07 — 0,10$.

IV. Отдача электротепловоза ¹

§ 22. Часовой расход тепловозом топлива на 1 л. с. выражается, как уже было указано во „Введении“ (§ 3), так:

$$B_{\text{ч/л. с.}} = \frac{632}{Y \cdot K} \text{ (кг)},$$

где:

632 — число калорий в одной л. с. в час ($= \frac{270\,000 \text{ кгм}}{427 \text{ кгм}}$; здесь:

$270\,000 \text{ кгм} = 75,60^2$ — работа 1 л. с. в час, а 427 кгм — механический эквивалент теплоты, т. е. количество работы, на которое затрачивается одна калория);

Y — отдача тепловоза;

K — теплотворная способность топлива (в калориях).

Следовательно, часовой расход $B_{\text{ч}}$ топлива тепловозом при касательной мощности N^* составляет:

$$B_{\text{ч}} = \frac{632 N^*}{Y \cdot K} \text{ (кг)}.$$

¹ Полный коэффициент полезного действия электротепловоза здесь назван „отдачей“ (хотя отдача и коэффициент полезного действия какой-либо машины, вообще говоря, синонимы) лишь в целях большего оттенения полного коэффициента полезного действия тепловоза в целом от частных коэффициентов полезного действия его отдельных составных механизмов.

Отсюда получаем выражение для отдачи тепловоза:

$$Y = \frac{632N^*}{K \cdot B_q} = \frac{632/K}{B_q/N^*}$$

или при $K = 10\,000$ кал. для мазута:

$$Y = \frac{0,0632}{B_q/N^*}.$$

где знаменатель B_q/N^* представляют собой расход топлива на одну касательную лошадиную силу.

Так как:

$$B_q = f_1(V, n_d, \sigma)$$

и

$$N^* = f_2(V, n_d, \sigma),$$

то, следовательно,

$$Y = f_3(V, n_d, \sigma),$$

а при определенном числе n_d оборотов дизеля:

$$Y = f(V, \sigma).$$

§ 23. В электротепловозах отдача тепловоза представляет собой произведение трех основных коэффициентов полезного действия:

$$Y = \eta_d \cdot \eta_e \cdot \eta_{\text{в.м.}}$$

где:

η_d —коэффициент полезного действия дизеля, равный произведению трех частных к. п. д.: $\eta_m \cdot \eta_0 \cdot \eta_{\text{т}}$, где, в свою очередь: η_m —механический коэффициент полезного действия дизеля, учитывающий механическую потерю в дизеле (составляет 0,70—0,75), η_0 —коэффициент полезного действия, учитывающий потери в идеальной машине, т. е. несовершенство самого процесса работы (составляет примерно 0,50) и $\eta_{\text{т}}$ —термический коэффициент полезного действия, учитывающий термические потери в реальном дизеле (составляет примерно 0,95). В общем $\eta_d \cong 0,33 - 0,36$;

η_e —коэффициент полезного действия электрической передачи, равный произведению трех частных к. п. д.: $\eta_g \cdot \eta_{\text{т.м.}} \cdot \eta_z$, где в свою очередь: η_g —коэффициент полезного действия генератора тока (составляет примерно 0,95), $\eta_{\text{т.м.}}$ —коэффициент полезного действия тяговых моторов, η_z —коэффициент полезного действия зубчатой передачи (произведение $\eta_{\text{т.м.}} \cdot \eta_z$ составляет 0,85—0,90). В общем $\eta_e \cong 0,80 - 0,85$;

$\eta_{\text{в.м.}}$ —коэффициент полезного действия вспомогательных механизмов (составляет примерно 0,98).

Составные элементы отдачи тепловоза наглядно показаны в виде следующей схемы (фиг. 19).

В общем отдача электротепловозов составляет 0,26—0,30, иными словами, тепловозы превращают в полезную работу 26—30% энергии топлива (против 9—10% современных паровозов при перегретом паре и подогревании воды и против 15—17% электровозов), что и представляет, как было выше отмечено, громадное преимущество тепловозов.

$$Y = f(V, \sigma)$$

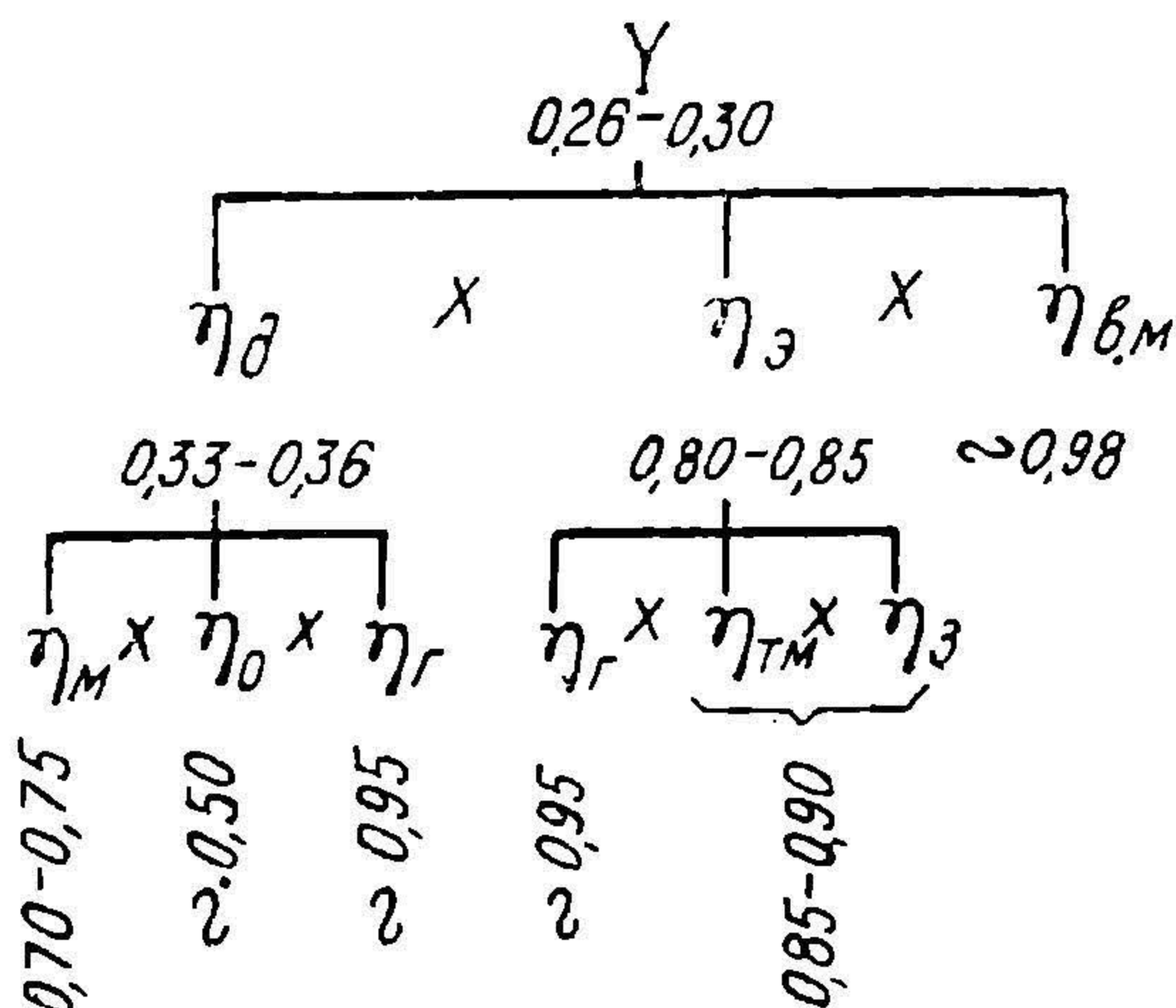
устанавливаются опытным путем.

§ 24. На фиг. 20, 21 и 22 представлены добытые опытным путем такого рода кривые для электротепловоза Э-Эл-2 (надштрихованные линии обозначают: слева—ограничения отдачи по сцеплению, а справа—по генератору).

Из рассмотрения приведенных кривых видно, что с точки зрения достижения наибольшей величины отдачи для электротепловоза Э-Эл-2 наивыгоднейшей форсировкой дизеля является вообще $\sigma = 3$, причем наивысшее значение отдачи имеет при числе оборотов дизеля в секунду $n_d = 4,5$, а именно:

$$Y = 0,274.$$

Затем из рассмотрения тех же кривых видно, как сильно снижает отдачу тепловозов наличие ограничения мощности по сцеплению и по генератору. Это обстоятельство, надо заметить, было учтено при проектировании электротепловозов последующих типов, в которых, например в электротепловозе Э-Эл-5 последнее ограничение, как было указано выше, как будто ликвидировано путем изменения электрической схемы.



Фиг. 19.

V. Уравнение движения поезда при электротепловозной тяге

§ 25. Дифференциальное уравнение движения груженого поезда, ведомого паровозом, получается, как известно, вида:

$$\frac{dV}{dt} = 120 (z - w - b),$$

где 120—ускорение поезда в км/ч за час при равнодействующей силе в 1 кг/т—получено из выражения:

$$\frac{127}{1 + \gamma},$$

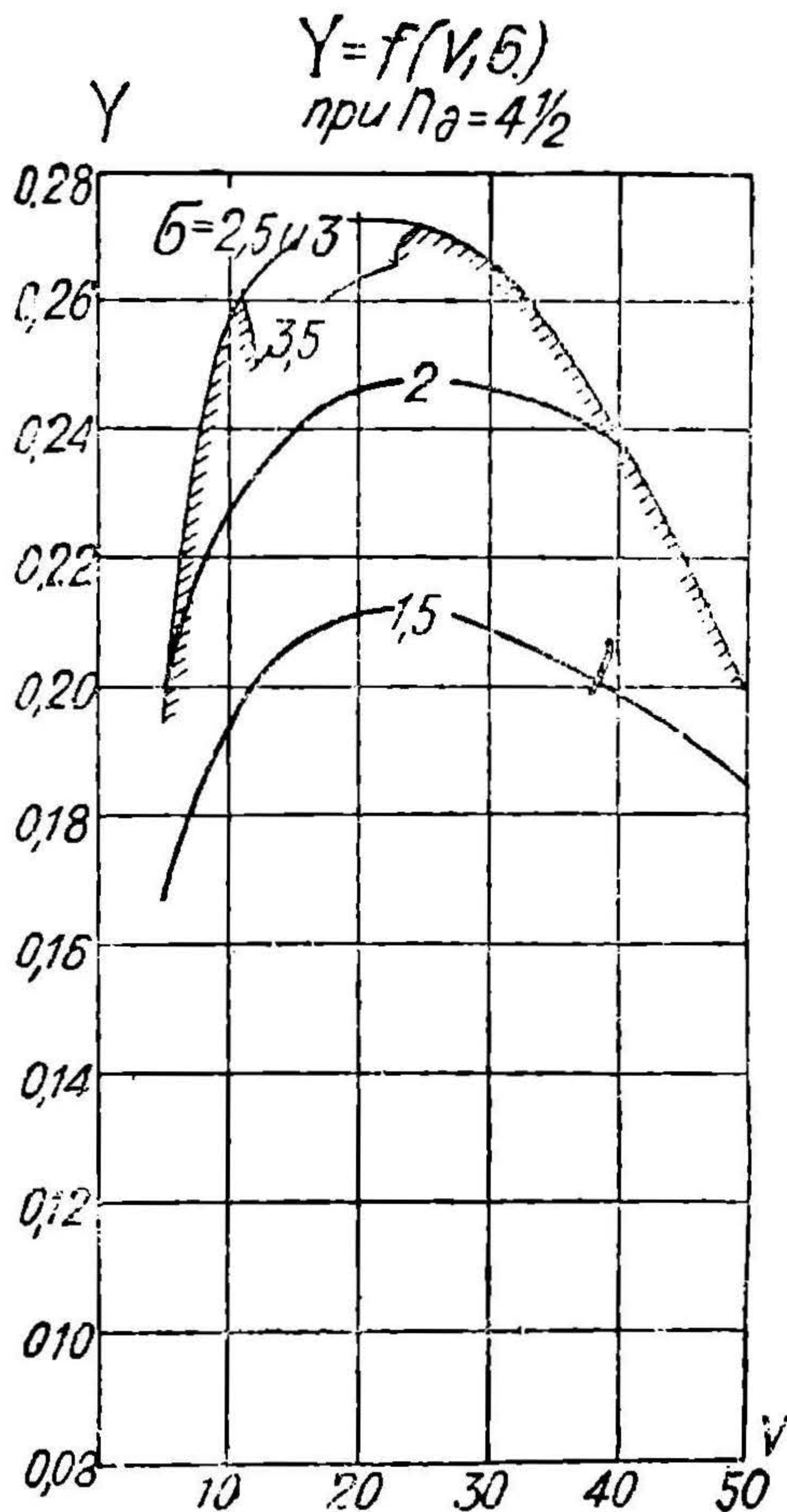
в котором γ представляет собой поправку на инерцию вращения колесных скатов (коэффициент инертности). Этим коэффициентом γ вращающиеся массы, т. е. массы колесных скатов паровоза и вагонов, выражающиеся через:

$$M_{sp} = \Sigma \frac{I}{R^2},$$

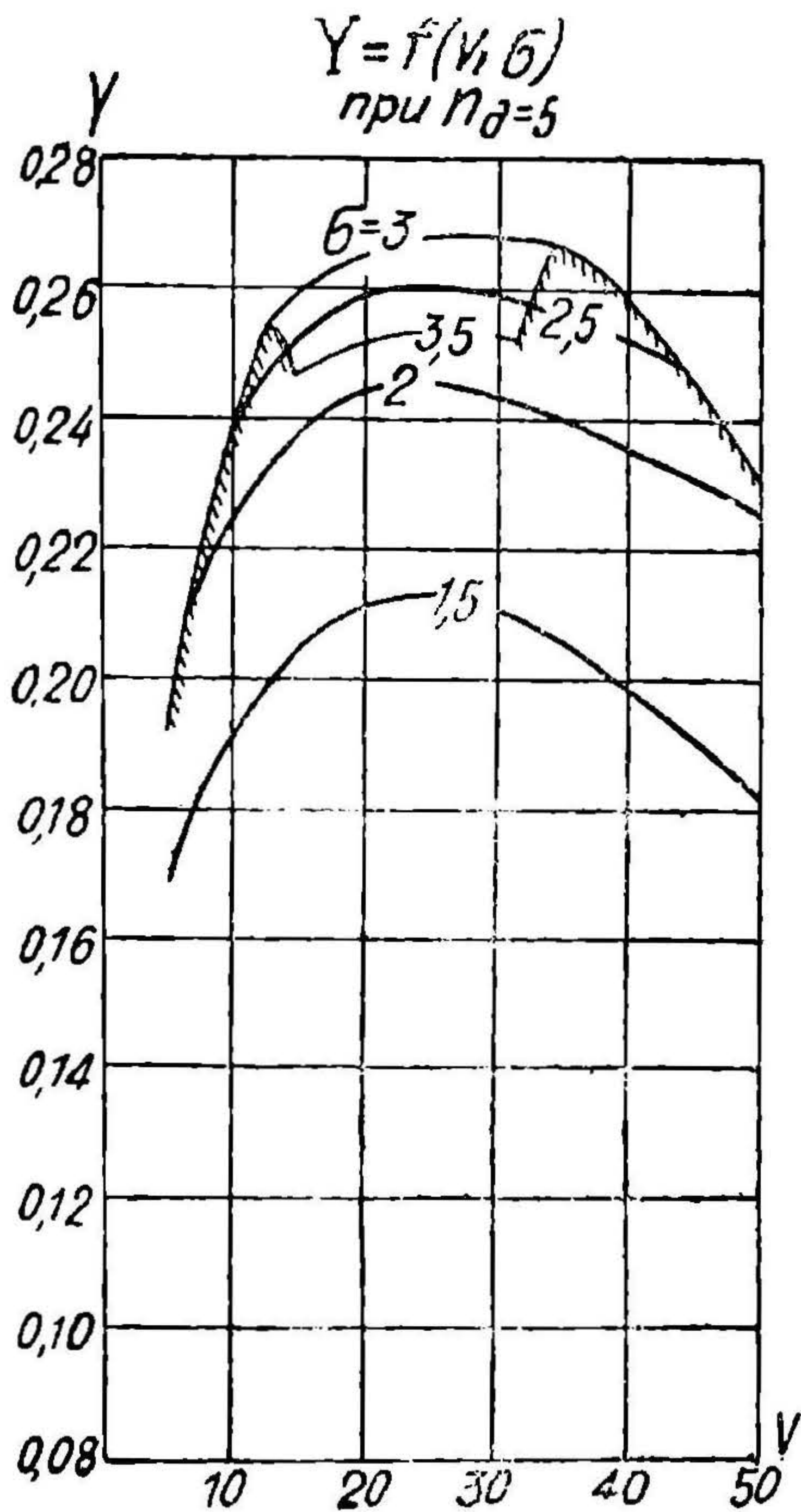
где I —полярный момент инерции полуската по отношению к его

оси вращения, а R —радиус колес, приводятся к массе поезда M_0 , имеющей поступательное движение и выражающейся через $\frac{Q}{g}$ (Q —полный вес поезда, g —ускорение силы тяжести), а именно: вращающиеся массы принимаются:

$$M_{вр} = \sum \frac{I}{R^2} = \gamma M_0.$$



Фиг. 20.



Фиг. 21.

В данном случае принимается один общий для всего поезда коэффициент $\gamma = 0,06$ и не делается различия между γ'' для паровоза и γ' для груженых вагонов, так как эти коэффициенты примерно равны между собой.

Для тепловоза с электрической передачей, у которого имеются не только вращающиеся массы, связанные с колесами и имеющие одинаковую с последними угловую скорость

$$\omega = \frac{V}{R},$$

но еще и массы якорей электромоторов, вращающихся гораздо скорее ведущих колес и имеющих угловую скорость:

$$\omega_a = \varphi \omega = \varphi \frac{V}{R},$$

где φ —величина передачи к моторам (в тепловозе Э-Эл-2=1:6,14), аналогичный коэффициент γ^{em} гораздо больше коэффициента γ^e груженых вагонов (тепловоз является много более инертным, чем груженные вагоны).

В данном случае вращающиеся массы электротепловоза выражаются:

$$M_{op}^{em} = \Sigma \frac{I}{R^2} + \varphi \Sigma \frac{I_a}{R^2},$$

а вагонов:

$$M_{op}^e = \Sigma \frac{I}{R^2}.$$

Следовательно, в данном случае вращающиеся массы поезда должны приниматься:

$$M_{op} = \gamma^{em} M_{op}^{em} + \gamma^e M_{op}^e,$$

где M_{op}^{em} и M_{op}^e —имеющие поступательное движение массы соответственно электротепловоза и вагонного состава.

Так как очевидно:

$$M_{op}^{em} = \frac{P_{em}}{g}$$

$$M_{op}^e = \frac{P_e}{g},$$

где P_{em} и P_e —веса соответственно электротепловоза и вагонов, то:

$$M_{op} = \gamma^{em} \frac{P_{em}}{g} + \gamma^e \frac{P_e}{g}.$$

Если теперь через γ обозначить коэффициент для вращающихся масс всего поезда весом $Q = P_{em} + P_e$, то очевидно:

$$M_{op} = \gamma \frac{Q}{g}.$$

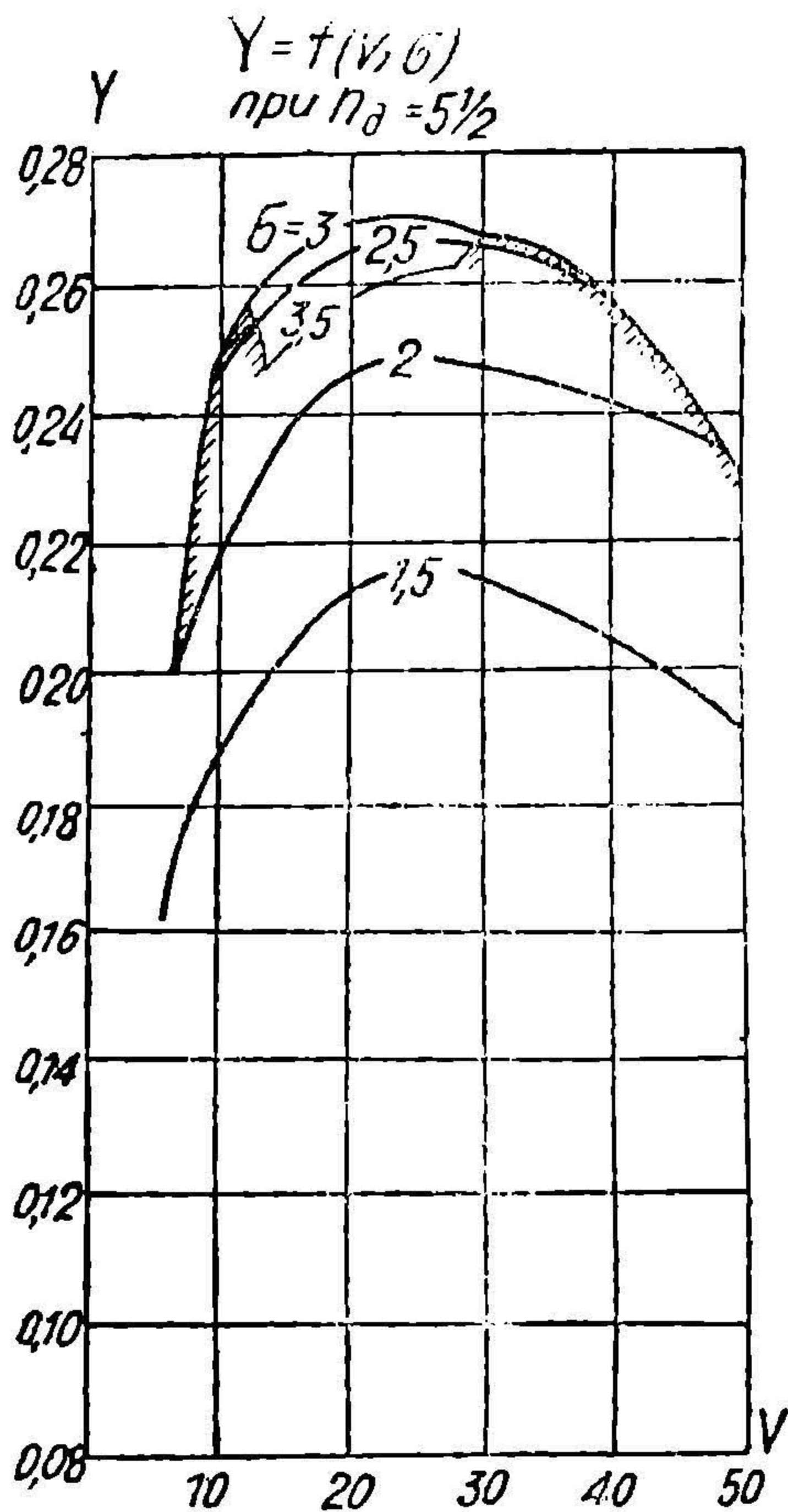
Следовательно:

$$\gamma \frac{Q}{g} = \gamma^{em} \frac{P_{em}}{g} + \gamma^e \frac{P_e}{g},$$

откуда:

$$\gamma = \gamma^{em} \frac{P_{em}}{Q} + \gamma^e \frac{P_e}{Q}.$$

На основании опытов γ^{em} для электротепловозов составляет 0,18, а γ^e для груженных товарных вагонов—0,055. С другой стороны, рас-



Фиг. 22.

четы показывают, что отношение $\frac{P_{ст}}{Q}$ для товарных поездов при руководящих подъемах до 15‰ составляет 0,05—0,15. Следовательно, $\frac{P_e}{Q}$ составляет соответственно 0,95—0,85. Отсюда получаем, что γ для груженых товарных поездов, ведомых электротепловозом, варьирует в пределах

$$\gamma = 0,18 \cdot 0,05 + 0,055 \cdot 0,95 = 0,061 \approx 0,06$$

$$\gamma = 0,18 \cdot 0,15 + 0,055 \cdot 0,85 = 0,073 \approx 0,07.$$

Следовательно ускорение поезда в км/ч за час при равнодействующей силе 1 кг/т будет варьировать в пределах:

$$\frac{127}{1,07} - \frac{127}{1,06} = 119—120 \text{ км/ч}^2.$$

Колебания названного ускорения в столь близких пределах, как 119—120 км/ч², не имеют никакого практического значения, а потому можно сказать, что и при тепловозной тяге возможно пользоваться уравнением движения груженого товарного поезда того же вида, что и при паровозной тяге, т. е.:

$$\frac{dV}{dt} = 120 (z - w - b).$$

VI. Вес состава поезда при электротепловозной тяге

§ 26. Наибольший возможный вес состава поезда ($\max P_e$) определяется вообще при тепловозной тяге совершенно так же, как и при паровозной тяге, из условия равномерного движения (динамического равновесия $Z=W$) поезда в самом трудном (в смысле профиля и плана) месте данного участка дороги, т. е. движения на руководящем подъеме.

Поэтому названный вес $\max P_e$ определяется по следующим аналогичным, как и при паровозной тяге (К. А. Оппенгейм, Тяговые расчеты, 3-е издание, 1932. стр. 123—124), формулам.

а) Если в поезде имеются в виду исключительно двухосные товарные вагоны:

$$\max P_e = \frac{Z}{w} - P_m (т),$$

где:

Z —расчетная сила тяги тепловоза (кг);

P_m —вес тепловоза (т);

w —общее удельное сопротивление поезда $= w_0 + i_p$ (кг/т), причем w_0 , как среднее для всего поезда, может определяться по формуле завода Baldwin'a:

$$w_0 = 1,5 + 0,05 V \text{ (кг/т)}.$$

б) Если в поезде имеются в виду исключительно четырехосные товарные вагоны:

$$\max P_e = \frac{Z - w^m P_m}{w^e},$$

где:

Z и P_m имеют прежние значения;

w^m —общее удельное сопротивление тепловоза $= w_0^m + i_p$ (кг/т),

где в свою очередь w_0^m —основное удельное сопротивление тепловоза;

w^e —общее удельное сопротивление вагонов $= w_0^e + i_p$ (кг/т),

причем основное удельное сопротивление вагонов w^* определяется по формуле Smith'a

$$w_0^{\frac{m}{4}} = \frac{V + 65}{12 + 0,55 g} \quad (\text{кг/т}).$$

в) Если в поезде предвидятся четырехосные товарные вагоны в количестве более 20—25⁰/₀:

$$\max P_s = \frac{Z - w^m P_m}{w^{\theta/cp}},$$

где:

Z , w^m и P_m имеют прежние значения;

$w^{\theta/cp}$ —среднее общее удельное сопротивление вагонов $= w_0^{\theta/cp} + i_p$ (кг/т), причем $w_0^{\theta/cp}$ определяется по формуле:

$$w^{\theta/cp} = a w_0^{\frac{m}{2}} + \beta w_0^{\frac{m}{4}},$$

где:

$$a = \frac{p^{\frac{m}{2}} q^{\frac{m}{2}}}{p^{\frac{m}{2}} q^{\frac{m}{2}} + p^{\frac{m}{4}} q^{\frac{m}{4}}};$$

$$\beta = \frac{p^{\frac{m}{4}} q^{\frac{m}{4}}}{p^{\frac{m}{2}} q^{\frac{m}{2}} + p^{\frac{m}{4}} q^{\frac{m}{4}}},$$

где:

$p^{\frac{m}{2}}$ и $p^{\frac{m}{4}}$ —проценты в поезде соответственно двух- и четырехосных вагонов;

$q^{\frac{m}{2}}$ и $q^{\frac{m}{4}}$ —вес (брутто) соответственно двух- и четырехосных вагонов.

§ 27. Первый вопрос в том, какой величины принимать в приведенных формулах расчетную силу тяги Z электротепловоза для определения наибольшего возможного на руководящем подъеме веса состава поезда.

При паровой тяге, когда сила тяги паровоза имеет при малых скоростях одно ограничение,—по сцеплению, в данном случае, как известно, принимается в расчет сцепная сила тяги (Z_c), при электротепловозной же тяге приходится считаться с тем, что сила тяги тепловоза при малых скоростях имеет, кроме ограничения по сцеплению, еще и ограничения по тяговым моторам, притом ограничений два: одно—соответствующее длительной, другое—часовой мощности названных моторов. Эти ограничения, как было указано выше, и дают верхний и нижний пределы силы тяги тепловоза.

Для определения наибольшего возможного на руководящем подъеме веса состава поезда расчетная сила тяги принимается в этих пределах в соответствии с характером профиля участка дороги и длиной затяжных руководящих подъемов.

Разумеется, при определении наибольшего возможного веса состава надлежит стремиться к возможно полному использованию тяговых

моторов тепловоза, иначе говоря, к использованию часовой мощности электротепловоза.

Однако, учитывая то обстоятельство, что электротепловоз может подходить к руководящему подъему с моторами уже нагретыми, невозможно применение на руководящем подъеме сил тяги, значительно превосходящих по величине длительную силу тяги тепловоза, и лишь в отдельных случаях при перевалистом профиле и отсутствии затяжных руководящих подъемов возможно использование при расчете веса состава поезда и часовой силы тяги тепловоза.

Кажущееся на первый взгляд недоиспользование тяговых моторов в случае применения на руководящем подъеме длительной мощности на деле, надо заметить, не так уже велико, если учесть, что часовая мощность в современных моторах с независимой вентиляцией, как было указано выше, всего на 10—20% больше длительной.

На практике наибольший возможный вес состава поезда при электротепловозной тяге приходится определять посредством приближений, а именно: посредством приближений подыскать такой вес состава, при движении которого на руководящем подъеме не может быть опасности перегрева тяговых моторов электротепловоза. Для этого приходится задаться некоторой расчетной силой тяги, лежащей в границах между значениями часовой и длительной силы тяги ($Z_{\text{м}}^{\text{тм/чс}}$ и $Z_{\text{м}}^{\text{тм/дл}}$), причем в качестве первого приближения можно при-

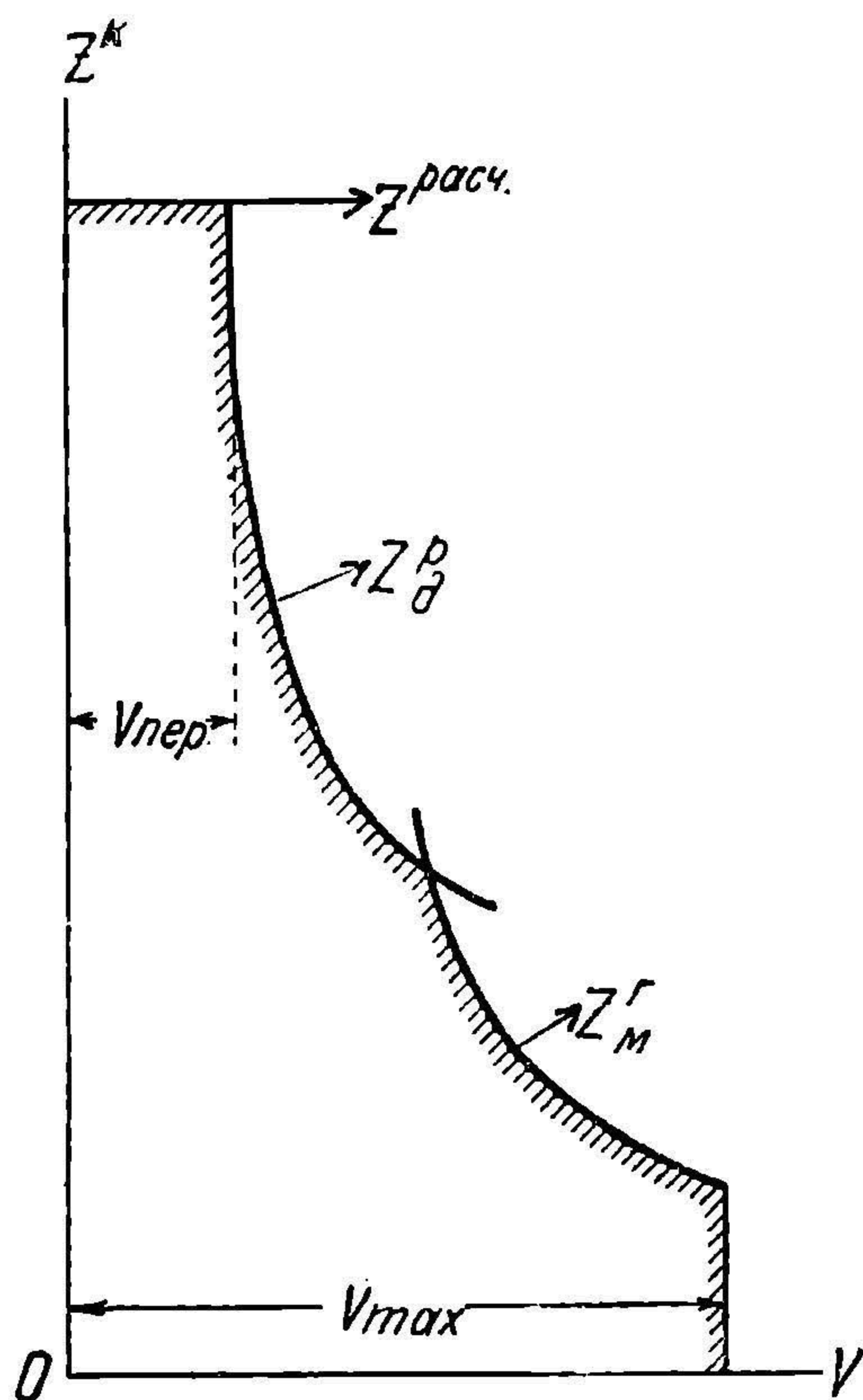
нять расчетную силу тяги $Z^{\text{расч}} = \frac{Z_{\text{м}}^{\text{тм/чс}} + Z_{\text{м}}^{\text{тм/дл}}}{2}$ Определив по этой силе

тяги наибольший возможный вес состава поезда, необходимо произвести тяговые расчеты и затем на основании таковых произвести проверку тяговых моторов электротепловоза на нагревание методами, указанными в разделе VII, притом при перевалистом профиле и отсутствии затяжных руководящих и близких к ним подъемов—методом эквивалентного тока, а при профиле—со сосредоточенными подъемами—методом непосредственного определения нагревания (построения сверхтемпературной кривой).

Если при проверке окажется, что при движении состава данного веса температуры обмоток в моторах получаются выше допустимого предела, иными словами, окажется, что расчетная сила тяги принята чрезмерно большой, то необходимо принять в расчет меньшую величину силы тяги и еще раз произвести проверку моторов на нагревание и т. д. до того момента, пока не получатся удовлетворительные результаты в отношении достигаемой обмотками тяговых моторов температуры. Словом, наибольший вес состава поезда может быть окончательно принят лишь по выяснении теплового состояния тяговых моторов тепловоза.

При этом, разумеется, окончательно выбранная расчетная сила тяги тепловоза по тяговым моторам должна быть сравнена со сцепной силой тяги тепловоза, причем, если бы оказалось, что первая превышает вторую, то за окончательную расчетную силу тяги должна быть принята сцепная сила тепловоза, иными словами, в данном случае наибольший возможный на руководящем подъеме вес состава поезда должен быть определен на основании условия сцепления колес тепловоза с рельсами.

§ 28. Другим (кроме силы тяги тепловоза) фактором, определяющим величину наибольшего возможного веса состава поезда, является величина установившейся скорости движения поезда на руководящем подъеме, которая должна быть принята в качестве расчетной для определения основного удельного сопротивления тепловоза и вагонов. Очевидно, за такую расчетную скорость должна приниматься, как



Фиг. 23.

и при паровой тяге, т. н. „переходная скорость“ ($V_{пер}$), т. е. скорость, соответствующая в каждом отдельном случае пересечению принятой для определения веса состава расчетной силы тяги ($Z^{расч}$), представляющей на диаграмме касательной силы тяги $Z^к = f(V)$ тепловоза (кривой общего ограничения данной силы тяги) горизонтальный участок с нисходящей ветвью названной кривой, представляющей собой дизельную силу тяги, соответствующую принятой расчетной форсировке дизеля (фиг. 23).

В заключение надлежит заметить, что при электротепловозной тяге возможно предвидеть допущение в исключительных случаях преодоления коротких подъемов круче руководящего за счет перегрузки тяговых моторов тепловоза сверх мощности, принятой для руководящего подъема, однако при условии проверки моторов на нагревание с тем, что в общем мощность не должна превышать полуторной часовой мощности.

VII. Проверка тяговых моторов на нагревание

§ 29. Как было указано выше (§ 14), наиболее опасным с точки зрения нагревания моторов является перегрев обмоток, в которых выделяется наибольшее количество теплоты по сравнению с остальными активными частями тягового мотора. Поэтому вопрос проверки тяговых моторов на нагревание сводится к проверке нагревания их обмоток, по температуре которых и составляется суждение о состоянии тягового мотора.

Проверка тяговых моторов на нагревание (обмоток) может, в зависимости от характера профиля, производиться одним из следующих двух методов: а) методом эквивалентного тока и б) методом непосредственного определения нагревания (построения сверхтемпературной кривой).

А. Метод эквивалентного тока

§ 30. Принимая во внимание только обмотки, разумеется, можно считать, что нагревание мотора зависит только от той теплоты, которая выделяется в обмотках, и потому в основу расчетов класть потери, оказывающие наибольшее влияние на нагрев обмоток, т. е. в общем потери, пропорциональные квадратам сил тока. При этом однако практически удобнее принимать вместо потерь, пропорциональных квадратам сил тока, прямо квадраты сил тока.

При переменных значениях нагрузочных токов мотора количество выделяемой за период времени теплоты может быть выражено через интеграл:

$$\int_0^T I^2 dt$$

или, очевидно, через произведение:

$$I_s^2 T,$$

если через I_s выразить силу некоторого тока постоянного значения, при которой за данный период времени T выделяется то же самое количество теплоты, в общем силу средне-нагревательного тока. Сила этого тока, который является, так сказать, *эквивалентным током*, определяется, очевидно, из равенства

$$\int_0^T I^2 dt = I_s^2 T$$

и составляет:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt},$$

т. е. средне-квадратичное значение по времени от действительных токов.

Как видно, „эквивалентный ток“ представляет собой ту постоянную нагрузку, которую имел бы мотор, работая непрерывно в течение времени T и выделяя то же самое количество теплоты, которое он фактически выделяет при прерывистой работе и непостоянной нагрузке.

На предположении, что нагрев мотора под действием прерывистых токов переменного значения равен нагреву непрерывным эквивалентным током постоянного значения, величина которого составляет средне-квадратичное значение по времени от действительных токов, и основан метод эквивалентного тока проверки моторов на нагревание.

Надо заметить, что, если имеется ряд n элементов пути различного профиля, для которых известны времена хода $t_1, t_2, \dots, t_n$ и соответственно силы тока $I_1, I_2, \dots, I_n$ в моторах при их прохождении, то эквивалентный ток для всего пути может быть, очевидно, определен на основании следующего выражения:

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_n^2 t_n}{\sum_1^n t_n}}.$$

Это и предопределяет возможный способ применения „метода эквивалентного тока“ на практике — способ графо-аналитический, состоящий в том, что участок дороги, на протяжении которого требуется проверка моторов на нагревание, разбивается на однородные в отношении профиля и плана элементы, затем обычным графо-аналитическим способом определяются времена t пробега этих элементов данным поездом, далее строится кривая зависимости силы тока I от скоростей прохода того же поезда на целых фиктивных уклонах — кривая $I = f(V)$ и наконец по этой кривой определяются силы тока I на данных элементах. Полученные данные заносятся в таблицу следующего образца:

[illegible]

Имея данные о $\sum t_n$ и $\sum I_n^2 t_n$, подсчитывают величину эквивалентного тока I , по указанной выше формуле

$$I_s = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_n^2 t_n}{\sum_1^n t_n}}.$$

Для обеспечения мотора от чрезмерного нагревания полученная величина эквивалентного тока должна быть меньше длительного тока, установленного для данного мотора, притом меньше с некоторым запасом, который можно выразить коэффициентом k , т. е. в общем должно иметь место условие:

$$I_{\alpha} \leq k I^{\partial \alpha}.$$

Коэффициент k на практике принимается равным 0,85—0,90.

Данный метод проверки моторов на нагревание дает гарантию лишь того, что в среднем после длительной работы мотор не перегревается, но не дает уверенности в том, что он не перегреется в отдельные моменты на тяжелых в отношении профиля участках пути.

Поэтому пользование „методом эквивалентного тока“ для проверки моторов на нагревание в общем допустимо в случаях производства ориентировочных расчетов и вообще в случаях, не требующих особенно большой точности расчетов, притом на участках с перевалистым профилем, без затяжных рукаводящих и близких к ним подъемов, и неприменим при профилях с сосредоточенными подъемами. При этом за период времени, за который моторы должны быть поверены на нагревание, желательно принимать полное время хода поезда (с учетом стоянок) между пунктами смены тепловоза и во всяком случае период не менее 5-6-часового движения поезда, приурочивая это движение поезда к наиболее тяжелому участку пути.

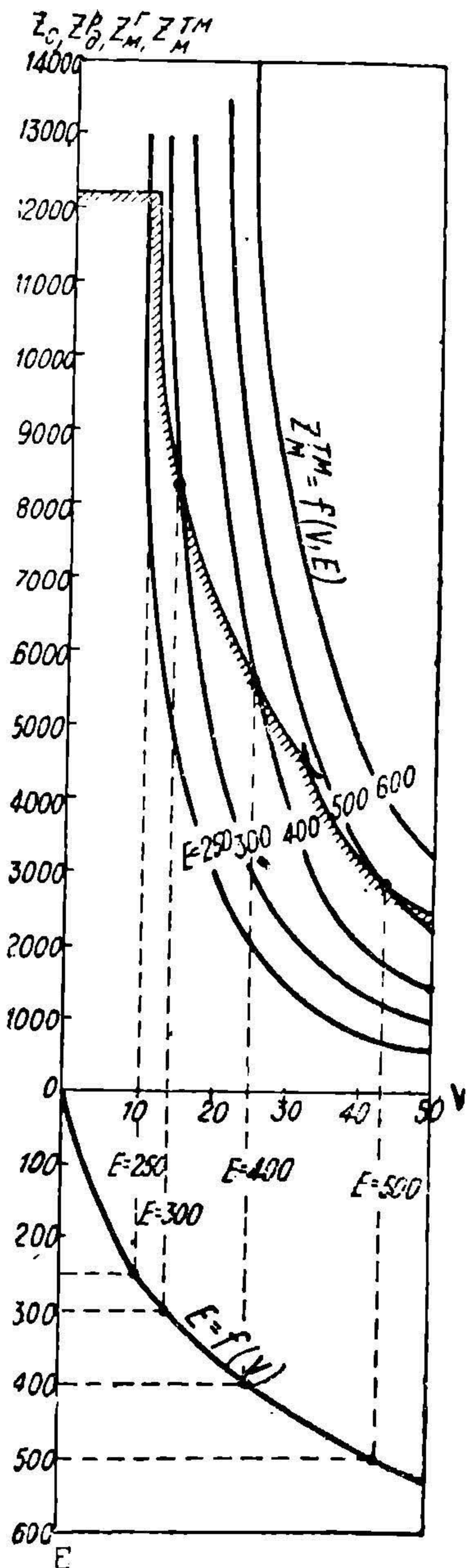
§ 31. Из сказанного видно, что при пользовании данным методом проверки моторов на нагревание необходимо иметь кривую $I=f(V)$ зависимости силы тока I от скорости движения электротепловоза V .

Эта кривая получается следующим образом.

Прежде всего необходимо построить кривую $E=f(V)$ зависимости напряжения от скорости. Для этого надо кривые машинной силы тяги по тяговым моторам $Z_m^{tm} = f(V)$ при разных напряжениях E совместить с паспортной кривой $Z=f(V)$ полного ограничения силы тяги: по сцеплению, по дизелю и по генератору (по возбуждению). Точки пересечения последней кривой с первыми кривыми дадут величины напряжений при скоростях, отвечающих данным точкам пересечения. Имея эти величины, не трудно построить кривую $E=f(V)$.

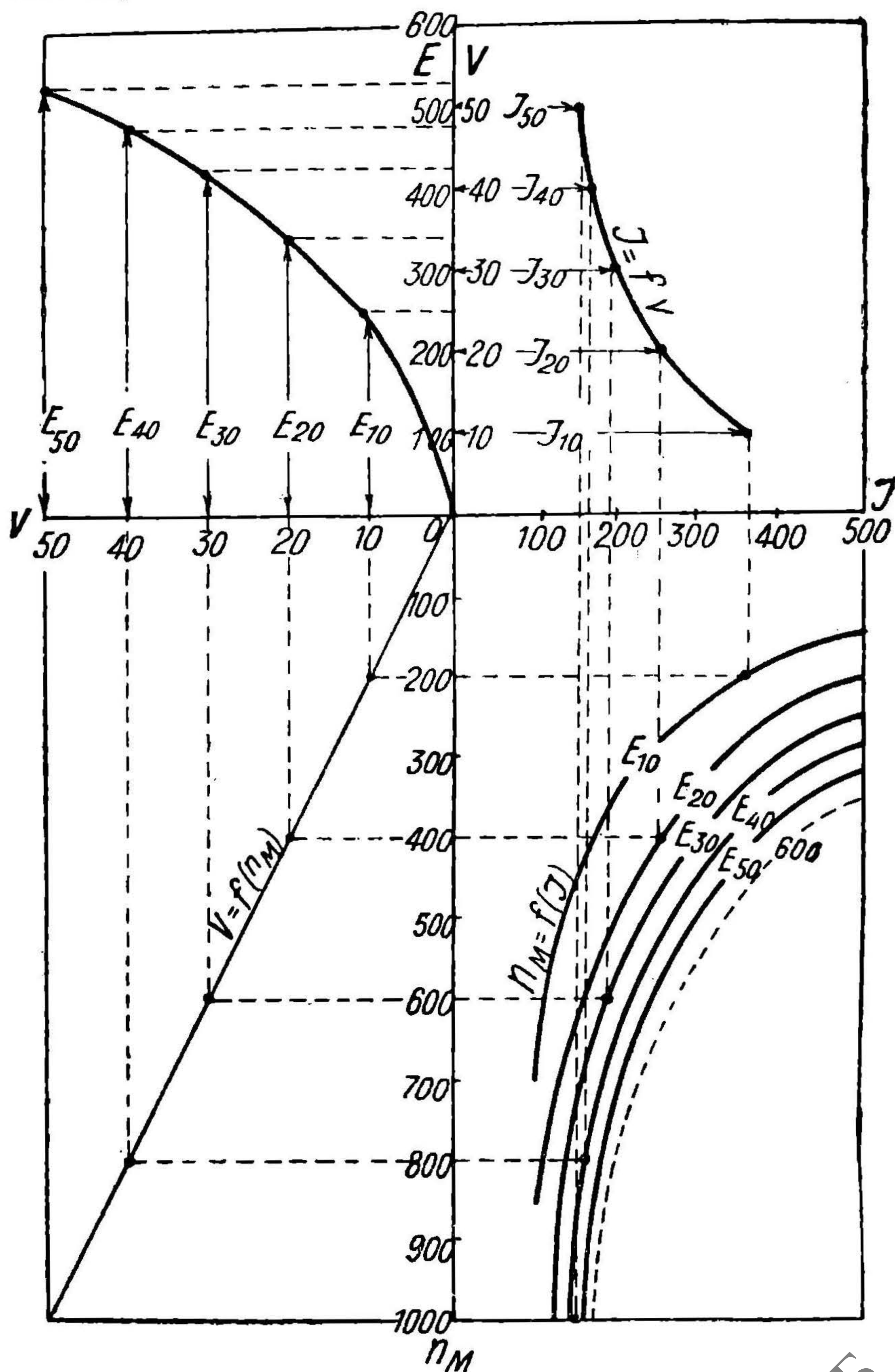
Положим, мы имеем тот электротепловоз, для которого выше (фиг. 8) были определены кривые $Z_m^{tm} = f(V)$ зависимости машинной силы тяги по тяговым моторам от скорости. На фиг. 24 воспроизведены эти кривые и кроме того нанесена паспортная кривая $Z^k=f(V)$ полного ограничения силы тяги, а затем показано и построение кривой $E=f(V)$, которое, как видно, в общем весьма просто.

Весьма просто построение и кривой $I=f(V)$ по кривой $E=f(V)$. Построение это как пример показано для того же электротепловоза на фиг. 25,



Фиг. 24.

Сперва надо слева направо построить полученную кривую $E=f(V)$ и по ней определить для скоростей 10, 20, 30, 40 и 50 км/ч напря-



Фиг. 25.

жения $E_{10}, E_{20}, E_{30}, E_{40}$ и E_{50} (составляющие в данном частном случае соответственно 250, 340, 420, 480 и 530 V). Затем слева внизу надо построить взятую из фиг. 7 для данного электротепловоза кривую

$V = f(n_{\mu})$, а справа внизу — кривые $n_{\mu} = f(I)$, отвечающие определенным напряжениям E_{10} , E_{20} , E_{30} , E_{40} и E_{50} , пользуясь для этого скоростной характеристикой данного электротепловоза, показанной на той же фиг. 7 (кривые на фиг. 25 нанесены путем интерполяции кривых на фиг. 7).

Имея эти три диаграммы, не трудно определить величины силы тока I_{10} , I_{20} , I_{30} , I_{40} и I_{50} , отвечающие скоростям 10, 20, 30, 40 и 50 км/ч, а затем справа наверху построить и самую кривую $I = f(V)$.

Фиг. 25 наглядно показывает последовательность всего рассмотренного построения.

Б. Метод непосредственного определения нагревания моторов

§ 32. Прежде чем излагать данный метод, необходимо несколько остановиться на вопросе определения нагрева вообще однородного твердого тела, а затем нагрева тяговых двигателей, понимая в общем под нагревом превышение температуры нагрева тела над температурой окружающей среды, или, как немцы говорят, „сверхтемпературу“ (Uebertemperatur). Последнюю, кстати заметить, ниже будем обозначать во всех случаях через τ (в градусах Цельсия).¹

Во всяком процессе нагревания тела имеет место тепловой баланс, заключающийся в том, что количество тепла, полученное телом за известный промежуток времени, равно сумме количества тепла, израсходованного на нагревание данного тела, и количества тепла, рассеянного телом за рассматриваемый промежуток времени в окружающую среду.

Возьмем бесконечно-малый промежуток времени dt и обозначим через:

Q — количество тепла, выделяемого в данном теле за единицу времени (в ватт-часах, ватт-минутах, ватт-секундах);

C — полную теплоемкость тела, т. е. количество тепла (в ватт-часах, ватт-минутах, ватт-секундах), потребное для повышения температуры тела на 1°Ц ($C = Gc$, где G — вес тела в кг, а c — удельная теплоемкость, т. е. теплоемкость 1 кг тела);

A — коэффициент теплоотдачи тела, т. е. количество тепла, рассеиваемое телом в окружающую среду за единицу времени при разности температур тела и названной среды в 1°Ц ($A = aH$, где H — поверхность тела в м^2 , a — удельный коэффициент теплоотдачи, т. е. коэффициент теплоотдачи на 1 м^2 , зависящий от свойства тела).²

Тогда, очевидно, указанный выше тепловой баланс (уравнение теплового состояния) нагретшегося тела может быть выражен следующим уравнением:

$$Qdt = C d\tau + A\tau dt.$$

¹ Как видно, в данном случае отсчет температуры нагретого тела будет вестись не от нуля по Цельсию, а от температуры окружающей среды.

² Удельный коэффициент теплоотдачи составляет:

$$a = \lambda (1 + \beta \sqrt{v}),$$

где

λ и β — коэффициенты, зависящие от свойства тела,

v — относительная скорость движения воздуха и охлаждаемой поверхности.

Значения коэф. λ и β даны Fischer-Hinnen'ом

Отсюда получаем:

$$dt = \frac{C d\tau}{Q - A\tau}.$$

Если мы теперь обозначим

$$Q - A\tau = a$$

и продифференцируем это уравнение, то получим:

$$d\tau = -\frac{da}{A}$$

и в связи с этим можем полученное выше выражение для dt написать так:

$$dt = -\frac{C}{A} \cdot \frac{da}{a} = -T_0 \frac{da}{a},$$

где T_0 , как видно $= \frac{C}{A}$.

Интегрируя последнее уравнение, получаем

$$t = -T_0 \ln a + C_1$$

или:

$$t = -T_0 \ln (Q - A\tau) + C_1:$$

где C_1 —произвольная постоянная.

Если предположить теперь, что начальная сверхтемпература тела τ_n , то можем написать

$$t = -T_0 [\ln (Q - A\tau)]_{\tau=\tau_n}^{\tau=\tau}$$

или:

$$t = -T_0 [\ln (Q - A\tau) - \ln (Q - A\tau_n)] = -T_0 \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_n} = T_0 \ln \frac{Q - A\tau_n}{Q - A\tau},$$

откуда получаем:

$$\ln \frac{Q - A\tau_n}{Q - A\tau} = \frac{t}{T_0},$$

что можно выразить так:

$$\frac{Q - A\tau_n}{Q - A\tau} = e^{\frac{t}{T_0}},$$

где e —основание натуральных логарифмов ($= 2,718$).

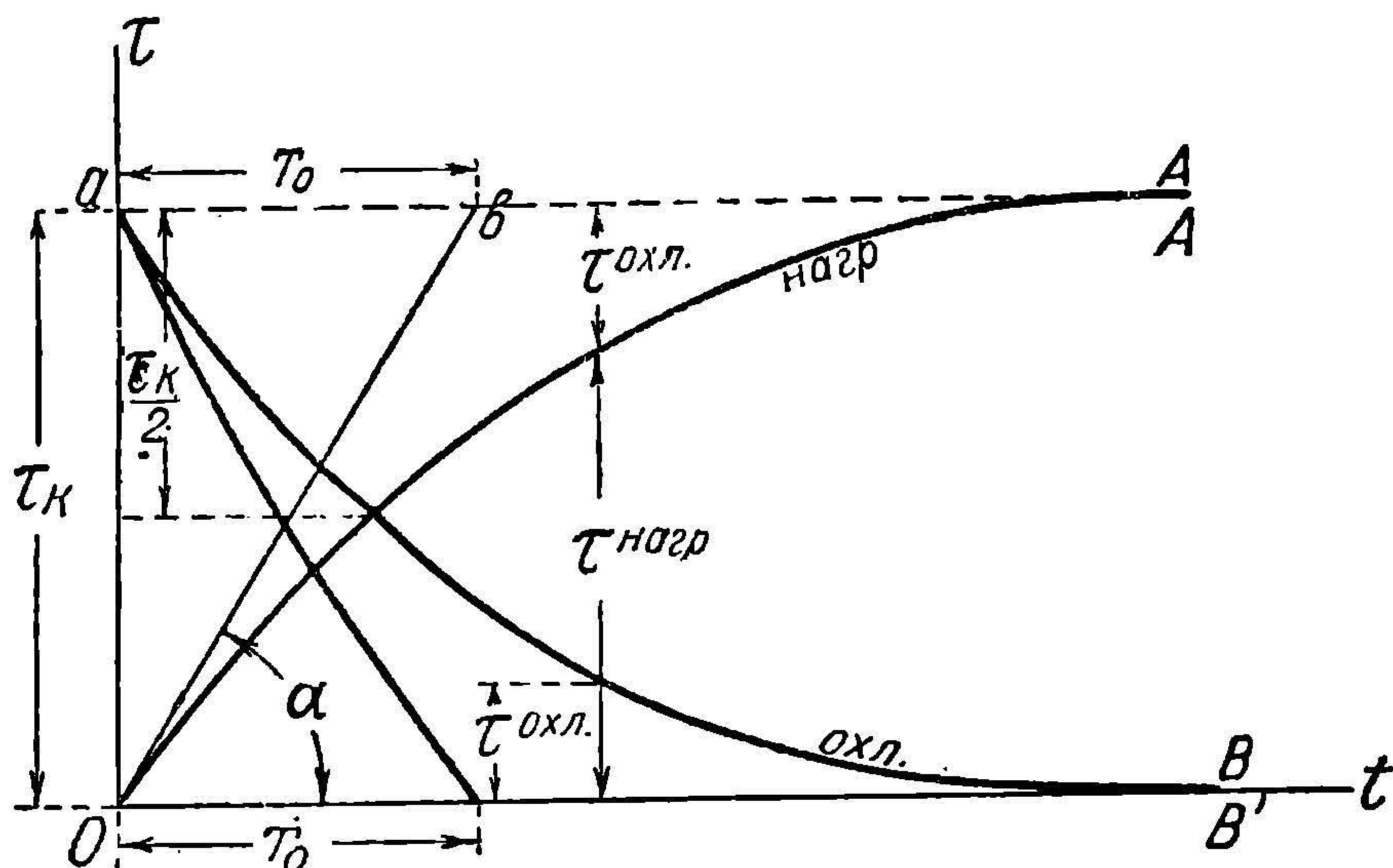
Решая последнее уравнение относительно τ получаем следующее:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Как видно, данная формула, представляющая собой не что иное, как закон постепенного поглощения теплоты (Ньютона), дает возможность определить сверхтемпературу τ , которую по истечении времени t получит тело, которое имело начальную сверхтемпературу τ_n и в котором в единицу времени выделялось количество Q тепла.

Очевидно, для определения τ необходимо знать коэффициент теплоотдачи A и величину $T_0 = \frac{C}{A}$, каковые величины, если состояние среды, в которой находится однородное твердое тело, не меняется, могут быть приняты для данного тела постоянными.

При этом надо заметить, что величина $T_0 = \frac{C}{A}$ имеет измерение времени, так как теплоемкость тела C имеет измерение $\frac{\text{количество тепла}}{\text{градусы температуры}}$, а коэффициент теплоотдачи A — измерение $\frac{\text{количество тепла}}{\text{градусы температуры} \times \text{время}}$.



Фиг. 26.

В связи с этим величина T_0 называется *постоянной времени* (Zeitkonstante) (для современных моторов она составляет 40—60 минут).

Если обратиться к полученному выше выражению для сверхтемпературы:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}},$$

то можно видеть, что в случае, когда начальная сверхтемпература тела $\tau_n = 0$, т. е. когда тело вначале (до нагревания) имеет температуру окружающей среды, сверхтемпература после нагрева составляет:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right).$$

Если по оси абсцисс откладывать время t , а по оси ординат сверхтемпературу τ (фиг. 26), то сверхтемпература тела при данном Q изобразится согласно этой формуле кривой OA .

Как видно, сверхтемпература, растущая сильно вначале, в конце концов подходит асимптотически к некоторому пределу конечной

сверхтемпературы τ_* , при которой приток тепла будет равен потере тепла в окружающую среду и температура тела не будет подниматься.

Величина конечной сверхтемпературы τ_* может быть определена из предыдущего выражения, если положить в нем время $t = \infty$.

Тогда имеем:

$$\tau_* = \frac{Q}{A},$$

из чего видно, что, τ_* не зависит от температуры тела, а зависит от притока тепла и теплоотдачи.

Последнее дает возможность, между прочим, установить физический смысл „постоянной времени“ T_0 .

Эта величина

$$T_0 = \frac{C}{A},$$

а так как

$$A = \frac{Q}{\tau_*},$$

то в результате

$$T_0 = \frac{C\tau_*}{Q}.$$

Так как здесь произведение $C\tau_*$ представляет собой количество тепла, поглощенное телом при нагреве его до конечной сверхтемпературы τ_* , и Q —количество тепла, выделяющееся в теле в единицу времени, то, очевидно, T_0 представляет собой то время, которое требуется для нагрева тела до сверхтемпературы τ_* , при условии, что потери тепла в окружающую среду не происходит.

Возвращаясь теперь к полученным выше двум основным формулам для определения сверхтемпературы τ : первой—для случая наличия начальной сверхтемпературы τ_* :

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_* e^{-\frac{t}{T_0}},$$

и второй—для случая отсутствия названной сверхтемпературы ($\tau_* = 0$):

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right),$$

мы видим, что они в силу того, что

$$\frac{Q}{A} = \tau_*,$$

могут быть заменены формулами следующих видов;

$$= \tau_* \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_* e^{-\frac{t}{T_0}}$$

и

$$\tau = \tau_* \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right).$$

Если мы теперь возьмем последнюю кривую, отвечающую случаю, когда $\tau_n = 0$ (начальная температура тела равна температуре окружающей среды) и изображенную на фиг. 26, и проведем к ней из начала координата касательную, то последняя отсечет на прямой aA' , отвечающей конечной сверхтемпературе τ_n , отрезок ab , который представит „постоянную времени“ T_0 .

Это вытекает из нижеследующего:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt},$$

каковая производная путем дифференцирования последнего из приведенных выше выражений получается следующего вида:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_n}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Так как в данном случае $t = 0$, то очевидно:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_n}{T_0}.$$

Следовательно, в результате:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\tau_n}{T_0}.$$

Из фиг. 26 видно, что конечная сверхтемпература τ_n выражается отрезком aO ; следовательно, постоянная времени T_0 выражается отрезком ab , являющимся подкасательной кривой OA .

Как в общем видно из сказанного выше, изображенная на фиг. 26 сверхтемпературная кривая $\tau = f(t)$, т. е. кривая сверхтемпературы в функции от времени, следует закону постоянных подкасательных, т. е. закону логарифмической кривой.

В заключение надо еще заметить, что полученные выше двух видов общие формулы для определения сверхтемпературы при нагревании однородного твердого тела, а именно, формулы:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}$$

и

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}},$$

пригодны не только для нагревания, но и для охлаждения названного рода тела.

Если предположить, что имеем тело, в котором не происходит выделения тепла, т. е. тело, для которого $Q = 0$, следовательно, и $\frac{Q}{A} = \tau_n = 0$, то для такого тела указанные формулы получают один общий вид:

$$\tau = \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}},$$

где τ_n представляет собой начальную сверхтемпературу.

Очевидно, что, если речь идет об охлаждении тела, предварительно нагретого, то τ_n представляет собой сверхтемпературу

при той же температуре. до которой тело было предварительно нагрето и, следовательно, в результате сверхтемпературу $\tau_{н.о}$ при начале охлаждения, почему для охлаждающегося тела уравнение сверхтемпературной кривой целесообразно написать в виде:

$$\tau^{охла} = \tau_{н.о} e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

Возьмем для примера рассмотренный выше случай нагревания тела при отсутствии сверхтемпературы ($\tau_{н.} = 0$) в начале нагрева, для какового случая уравнение сверхтемпературной кривой, как получено было выше, имеет вид:

$$\tau = \tau_{н.} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right),$$

а названная кривая имеет вид, изображенной на фиг. 26, и предположим, что тело нагревается до сверхтемпературы $\tau_{н.}$ и что после этого нагрева тело начинает охлаждаться. Обозначим в данном случае, согласно сказанному выше, конечную сверхтемпературу через $\tau_{н.о}$ ($= \tau_{н.}$). Тогда уравнение сверхтемпературной кривой при нагревании выразится:

$$\tau^{нагр} = \tau_{н.о} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) = \tau_{н.о} - \tau_{н.о} e^{-\frac{t}{T_0}},$$

но согласно полученному выше:

$$\tau_{н.о} e^{-\frac{t}{T_0}} = \tau^{охла}.$$

Следовательно:

$$\tau^{нагр} = \tau_{н.о} - \tau^{охла}$$

или:

$$\tau_{н.о} - \tau^{нагр} = \tau^{охла}.$$

Из этого видно, что для любого времени t разность между ординатой $\tau_{н.о}$ и ординатой $\tau^{нагр}$ сверхтемпературной кривой при нагревании представляет собой ординату $\tau^{охла}$ сверхтемпературной кривой при охлаждении. Отсюда следует, что последняя кривая, изображенная на фиг. 26 в виде кривой aB , представляет собой не что иное, как зеркальное изображение сверхтемпературной кривой при нагревании с конечной сверхтемпературой $\tau_{н.о}$.

§ 33. Все сказанное выше по отношению к нагреванию и охлаждению однородного твердого тела может быть применено и к случаю нагревания и охлаждения интересующих нас в электротепловозах тяговых моторов, имея в данном случае в виду, как было указано выше, наиболее нагревающуюся часть последних, соприкасающуюся с изоляцией, — обмотки. Принимая во внимание только последние, необходимо в основу расчетов изменения температуры класть потери, оказывающие наибольшее влияние на нагрев обмоток, т. е. в общем потери, пропорциональные квадратам силы токов. При этом однако практически удобнее при производстве названных расчетов принимать, как уже было указано выше (§ 30), вместо потерь, пропорциональных квадратам силы токов, прямо величины квадратов силы токов.

В общем практика показывает, что в большинстве случаев сверхтемпературная кривая мотора мало отличается от кривых, подчиняющихся полученным выше уравнениям для общего случая:

$$t = \frac{C}{A} \cdot \ln \frac{Q - A\tau_n}{Q - A\tau} = T_0 \cdot \ln \frac{Q - A\tau_n}{Q - A\tau}$$

или

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}}$$

или для частного случая отсутствия в начале нагревания сверхтемпературы ($\tau_n = 0$) уравнениям:

$$t = T_0 \cdot \ln \frac{Q}{Q - A\tau}$$

или

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right).$$

В связи с сказанным выше последние два уравнения могут быть переписаны в следующем виде:

$$t = T_0 \cdot \ln \frac{I^2}{I^2 - A\tau}$$

и

$$\tau = \frac{I^2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right).$$

Здесь весьма важной величиной, притом величиной, необходимой, как это будет видно ниже, для пользования вообще методом непосредственного определения нагревания моторов, является величина T_0 — „постоянная времени“. Эта величина для различных моторов определяется опытным путем и дается заводом для каждого типа мотора вместе с его электромеханическими характеристиками. Если величина T_0 почему-либо не дана, то она может быть определена приближенно следующим образом на основании приведенного выражения для времени t .

Прежде всего определим на основании приведенного выражения для сверхтемпературы τ входящую в выражение для t величину теплоотдачи A . Для этого обратимся к режиму длительной мощности мотора и в связи с этим подставим в выражение для τ :

$$\tau = \infty \text{ и } I = I_{\partial\lambda}.$$

Тогда получим:

$$\tau = \frac{I_{\partial\lambda}^2}{A},$$

отсюда:

$$A = \frac{I_{\partial\lambda}^2}{\tau}.$$

После этого обратимся к выражению для t и поставим в него, с одной стороны, значения t и I , соответствующие режиму часовой мощности мотора, а именно: $t = 60$ мин. и $I = I_{\text{ч}}$, с другой же стороны только что полученное значение для A .

Тогда получим:

$$60 = T_0 \cdot \ln \frac{I_{\text{чс}}^2}{I_{\text{чс}}^2 - I_{\text{дл}}^2}$$

а отсюда:

$$T_0 = \frac{60}{\ln \frac{I_{\text{чс}}^2}{I_{\text{чс}}^2 - I_{\text{дл}}^2}}$$

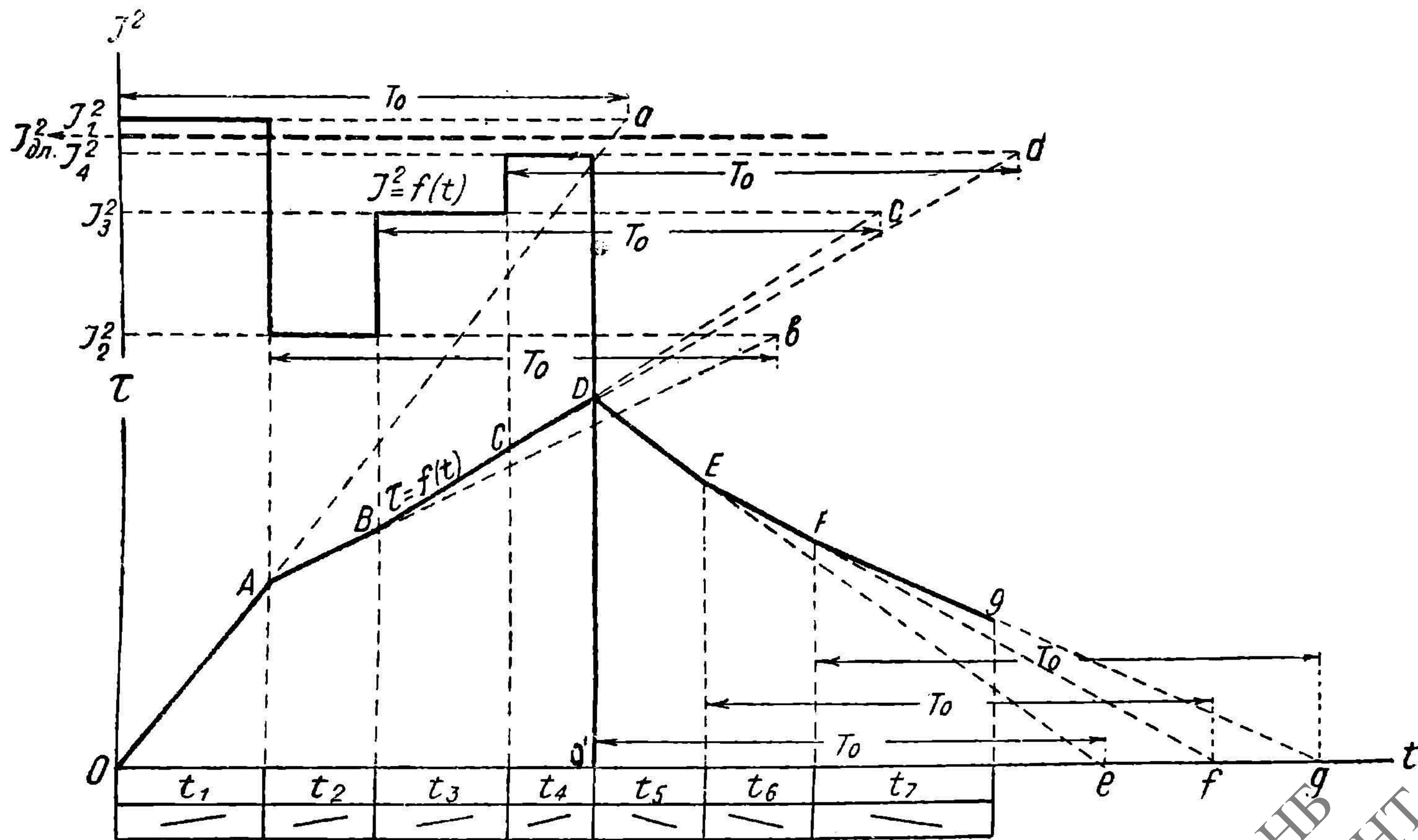
или, переходя от натуральных логарифмов $\ln$ к бригговым $\lg$ ¹:

$$T_0 = \frac{60}{2,3 \cdot \lg \frac{I_{\text{чс}}^2}{I_{\text{чс}}^2 - I_{\text{дл}}^2}}$$

Данная величина T_0 , являющаяся, как было указано выше, подкасательной логарифмических кривых нагрева и охлаждения, может для современных применяемых на тепловозах электромоторов с независимой вентиляцией (независимой от числа оборотов моторов) приниматься величиной постоянной, не зависящей от скорости движения тепловоза, поскольку не меняется величина теплоотдачи вследствие постоянной величины объема охлаждающего воздуха. На том, что кривые нагрева и охлаждения моторов являются логарифмическими кривыми, имеющими постоянную подкасательную величину, равной „постоянной времени“ T_0 данного мотора, и основан „метод непосредственного определения нагревания моторов“, сводящийся в результате к графическому построению сверхтемпературной кривой в функции времени хода поезда, т. е. $\tau = f(t)$. В общем названный метод заключается в нижеследующем.

§ 34. После того, как на основании тяговых расчетов определены скорости равномерного движения поезда на разных фиктивных уклонах и площадке, в общем установлена кривая $V = f(i_\phi)$, и затем изложенным выше (при рассмотрении „метода эквивалентного тока“) способом (фиг. 25) определены силы тока при разных скоростях, т. е. установлена кривая $I = f(V)$, не трудно определить силы тока на данных фиктивных уклонах и в общем установить кривую $I = f(i_\phi)$. Так как время t хода поезда на отдельных элементах данного участка дороги зависит от величины фиктивных уклонов этих элементов, т. е. $t = f(i_\phi)$, то при определении рассматриваемым методом нагрева моторов необходимо, как это понятно из сказанного выше, прежде всего построить кривую квадратов сил тока в функции времени, т. е. кривую $I^2 = f(t)$. Для этого по оси абсцисс откладываются последовательно величины отрезков времени $t_1, t_2, t_3...$, соответствующих времени хода поезда на отдельных элементах данного участка дороги, а на оси ординат—величины $I_1^2, I_2^2, I_3^2...$, квадратов среднего значения тока для данных отрезков времени, в общем—как то показано на фиг. 27, в предположении, что элементы 5, 6 и 7 представляют собой скаты, на которых тепловоз движется без тока. Необходимо заметить, что в целях большей точности построения далее кривой $\tau = f(t)$ желательно, чтобы откладываемые по оси абсцисс отрезки

¹ $\ln x = \ln 10 \cdot \lg x = 2,30259 \cdot \lg x$.



Фиг. 27.

времени не превосходили $1/5—1/8$ „постоянной времени“ T_0 данных моторов, почему в случае, если время хода на каком-либо элементе превосходит указанную норму, необходимо его разбить на части.

После построения кривой $I^2 = f(t)$ приступают к построению искомой сверхтемпературной кривой $\tau = f(t)$. Для этого надо на высоте, соответствующей квадрату силы тока для первого элемента I_1^2 , отложить от оси ординат величину „постоянной времени“ T_0 (очевидно, в масштабе времени, принятом для отрезков времени на оси абсцисс) и конец ее соединить с началом координат. Отрезок OA полученной линии Oa , изображающей изменения сверхтемпературы мотора при силе тока I_1 , находящийся в пределах рассматриваемого промежутка времени t_1 , очевидно, представит собой в силу изложенного выше первый элемент искомой сверхтемпературной кривой.

Далее построение последней необходимо вести от точки A , а именно—на высоте, соответствующей квадрату силы тока для второго элемента I_2^2 от вертикали, проходящей через точку A , снова отложить величину T_0 и конец ее b соединить с точкой A . Тогда отрезок AB полученной линии Ab , находящийся в пределах второго промежутка времени t_2 , представит собой второй элемент искомой кривой.

Так необходимо поступать и далее до встречи с элементом, в пределах которого тепловоз будет двигаться без тока в моторах. В данном примере таким элементом, как было отмечено выше, является пятый элемент и, следовательно, в результате кривая $OABCD$ представляет собой кривую изменения сверхтемпературы моторов при нагревании под влиянием переменной нагрузки.

Начиная с пятого элемента,—в данном примере—моторы вследствие отсутствия в них тока начнут охлаждаться. Чтобы определить кривую изменения сверхтемпературы моторов при охлаждении, необходимо от точки O' , соответствующей концу (по времени) периода хода под током, отложить на оси абсцисс величину T_0 и конец ее e соединить с точкой D . Тогда отрезок DE полученной линии De представит собой пятый элемент искомой сверхтемпературной кривой. Так необходимо поступать и далее.

Получив в результате сверхтемпературную кривую $\tau = f(t)$ (в данном примере кривую $OABCEFG$, часть $OABCD$ которой соответствует нагреванию, а часть $DEFG$ —охлаждению), необходимо определить абсолютное значение наибольшей достигнутой тяговыми моторами сверхтемпературы при нагревании (в данном примере величину $O'D$). Для этого надо знать масштаб сверхтемпературы, получившийся при произвольно выбранных масштабах времени t и квадратов тока I^2 . Масштаб этот может быть установлен на основании нижеследующего.

При нагрузке моторов длительным током I_{oa} они должны будут по истечении некоторого промежутка времени (на практике равного $4T_0—5T_0$) достичь конечной установившейся сверхтемпературы τ_{∞} , причем тогда логарифмическая сверхтемпературная кривая асимптотически подойдет, как было отмечено выше (фиг. 26), к линии, параллельной оси абсцисс и лежащей на уровне названной сверхтемпературы τ_{∞} . Построенная на фиг 27 сверхтемпературная кривая представляет собой не действительную логарифмическую кривую, а кривую, состоящую из касательных к логарифмической кривой. Следовательно, в конце построения такого рода кривой касательная должна оказаться параллельной оси абсцисс, а это, очевидно, равносильно тому,

что конечная сверхтемпература τ_{∞} моторов будет лежать на уровне $I_{\partial\lambda}^2$.

Отсюда и можно установить масштаб сверхтемпературы τ .

Назовем через m принятый для квадратов тока I^2 масштаб:

$$1 (\text{ампер}^2) = m (\text{мм}),$$

а через n —искомый масштаб сверхтемпературы τ :

$$1 (^\circ\text{Ц}) = n (\text{мм}).$$

Кроме того обозначим через $\tau_{\partial\lambda}$ предельную допустимую при длительном токе сверхтемпературу.

Тогда в силу сказанного выше можно написать:

$$m \cdot I_{\partial\lambda}^2 = n \cdot \tau_{\partial\lambda}$$

откуда и получим искомый масштаб:

$$n = \frac{m \cdot I_{\partial\lambda}^2}{\tau_{\partial\lambda}}$$

§ 35. Надлежит заметить, что при поверках моторов (обмоток якорей) на нагревание необходимо, разумеется, расчет доводить до установившейся сверхтемпературы моторов.

Что касается до величины температуры нагревания обмоток якорей, которые могут быть допущены для моторов вообще ж.-д. электродвигателей в эксплуатационных условиях их работы, то таковые, разумеется, прежде всего зависят от рода материалов, примененных для изоляции, а именно: применены ли нетеплостойкие материалы органического происхождения (обработанная бумага, хлопчатая бумага, шелк и т. п.), подвергнутые пропитке,—в общем т. н. „изоляция класса А“, или же теплостойкие материалы неорганического происхождения (асбест, слюда, миканит и т. п.) в соединении со связывающими веществами,—т. н. „изоляция класса В“. Затем названные величины зависят от режима моторов (часовой или длительной мощности их) и наконец от способа измерения температуры обмоток: измерения поверхностной температуры обмотки при помощи термометра или термопары, измерения изменений омического сопротивления обмотки при нагреве, наконец измерения температуры обмотки при помощи термопары, заделанной внутри обмотки при изготовлении мотора и поставленной по возможности в точке наибольшего нагрева.

Нормы предельной допустимой „температуры нагрева“ в обмотках якорей электромоторов *при длительной работе*, принятые у нас IX всесоюзным электротехническим съездом, приведены в нижеследующей таблице (нормы при измерении температуры при помощи заделанной внутри обмотки термопары не разработаны), причем надо иметь в виду, что в электротепловозах (так же как и электровозах) применяется изоляция класса В.

* Практически удобнее масштаб m принимать не для I^2 , а для $\frac{I^2}{10000}$. В этом случае искомый масштаб n выразится, очевидно, через:

$$n = \frac{m \cdot I_{\partial\lambda}^2}{\tau_{\partial\lambda} \cdot 10^4}.$$

Способ измерения температуры	Предельная допустимая температура нагрева	
	при изоляции класса А	при изоляции класса В
По термометру на поверхности.	90°	105°
По сопротивлению	110°	130°

Предельные допустимые величины „сверхтемпературы“ получаются, очевидно, путем вычета из указанных норм допустимых температур нагрева наличных величин температур наружного воздуха.

В заключение надо заметить, что при проверке моторов на нагревание изложенным выше способом, в общем рекомендуемым при профиле со сосредоточенными затяжными подъемами, целесообразно предусматривать в температуре запас в размере 20—25% по сравнению с предельной допустимой температурой для ж.-д. электродвигателей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ВВЕДЕНИЕ

1. Что такое тепловоз?
2. Почему в тепловоз между двигателем и осями ведущих колес вводится специальная „передача“?
3. Какие известны главные системы передачи и в чем заключаются основные идеи этих систем?
4. Какая из систем передач является наиболее надежной и изученной?
5. Из каких основных частей состоит вообще электротепловоз и в частности электротепловоз Э-Эл-2?
6. Что, в сущности, представляет собой электротепловоз?
7. Какое главнейшее преимущество тепловозов перед паровозами?
8. В чем вообще заключаются преимущества тепловозов перед паровозами и электровозами?
9. Как принято у нас обозначать серии тепловозов?
10. Каких серий у нас имеются и строятся тепловозы?
11. На каких протяжениях существующих и вновь проектируемых ж.-д. линий намечено введение во второй пятилетке тепловозной тяги?
12. В каких районах находятся линии, на которых имеется в виду ввести во второй пятилетке тепловозную тягу, и почему выбраны именно эти линии?

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГИ

1. В каких частях расчеты тяги поездов различны при электротепловозной тяге и при паровозной тяге и на чем основано данное различие?
2. Одинакова ли точность расчетов при электротепловозной тяге и при паровозной тяге?

I. ОСНОВНОЕ ЕСТЕСТВЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗА

1. По каким формулам определяется основное удельное сопротивление электротепловоза как повозки, как машины при движении без тока и одновременно как повозки и как машины при движении без тока?

2. Какие основные удельные сопротивления электротепловоза больше, чем паровоза, и какие меньше?
3. Какое дает электротепловоз преимущество перед паровозом, в виду его меньшего основного удельного сопротивления при движении без тока?

II. СИЛА ТЯГИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗА

1. На чем основан процесс получения во всяком тепловозе силы тяги?
2. Скольких и каких именно родов надо различать силу тяги всякого тепловоза по предельным производительностям его главных частей?
3. Скольких и каких именно видов надо различать каждого рода силу тяги всякого тепловоза?

1. Дизельная сила тяги тепловоза

1. По какой основной формуле определяется дизельная сила тяги всякого тепловоза?
2. Какого рода имеются ограничения для дизельной силы тяги тепловоза?

а) Сила тяги по режиму дизеля

1. Чем обуславливается режим всякого дизеля?
2. Что следует понимать под „наполнением“ дизеля?
3. Какая разница между действительным и условным наполнением дизеля?
4. Почему под наполнением дизеля целесообразнее понимать действительное наполнение, а не условное?
5. Какая имеется зависимость между действительным и условным наполнением дизеля?
6. Из какого условия определяется мощность дизеля по наполнению и числу его оборотов?
7. Как в результате выражается мощность дизеля по наполнению и числу его оборотов?
8. Какая имеется зависимость между индикаторным давлением в цилиндрах дизеля и наполнением последнего?
9. По какой формуле определяется дизельная сила тяги тепловоза по режиму дизеля?

б) Сила тяги по холодильнику

1. В чем заключается суть ограничения дизельной силы тяги тепловоза по холодильнику?
2. В чем заключается работа холодильника в состоянии теплового равновесия при отсутствии наружного охлаждения холодильника и при наличии названного охлаждения?
3. Как определяется для какой-либо температуры наружного воздуха и какого-либо числа оборотов дизеля значение наполнения, отвечающего условию полного использования холодильника?
4. Как по имеющейся кривой силы тяги тепловоза по режиму дизеля построить кривую силы тяги по холодильнику?

2. Машинная сила тяги электротепловоза

1. По какой основной формуле определяется машинная сила тяги электротепловоза?
2. Какого рода имеются ограничения для машинной силы тяги электротепловоза?

а) Сила тяги по генератору

1. Как выражается нагрузка, которую динамомашинка принимает от дизеля?
2. Как выражается нагрузка, которую получают движущие колеса электротепловоза?
3. В чем заключается назначение передаточного механизма в электротепловозе?
4. По какой формуле определяется сила тяги электротепловоза по генератору?
5. По какой формуле определяется скорость электротепловоза по возбуждению?
6. Как построить кривую ограничения дизельной силы тяги электротепловоза по генератору?
7. В чем заключается недостаток наличия в электротепловозах ограничения дизельной силы тяги по генератору?

б) Сила тяги по тяговым моторам

1. В чем заключается суть ограничения силы тяги электротепловоза по тяговым моторам?
2. От чего зависит степень перегрева моторов?
3. Чем обуславливается сила тяги электротепловоза по тяговым моторам?
4. Что понимается под „длительной“ силой тяги электротепловоза по тяговым моторам?

5. Что понимается под „часовой“ силой тяги электротепловоза по тяговым моторам?
6. Каково соотношение между длительной и часовой силами тяги?
7. Что понимается под „мгновенной“ силой тяги электротепловоза по тяговым моторам?
8. По какой формуле определяются сила тяги электротепловоза по тяговым моторам?
9. От чего зависит и как определяется скорость движения электротепловоза?
10. Как определяется зависимость между силой тока в тяговых моторах и скоростью движения электротепловоза?
11. Как определяется верхний и нижний пределы ограничения силы тяги электротепловоза по тяговым моторам?

3. Сцепная сила тяги электротепловоза

1. Из какого условия определяется сцепная сила тяги всякого тепловоза?
2. В каких тепловозах необходимо различать коэффициент сцепления колес с рельсами от коэффициента трения и когда коэффициент сцепления равен коэффициенту трения?
3. Из какого условия определяется сцепная сила тяги электротепловоза с индивидуальными на колесных осях тяговыми моторами?
4. Какое добавочное условие должно быть соблюдено для каждой оси электротепловоза с индивидуальными на колесных осях тяговыми моторами?
5. Какие тепловозы, — со спарниками или без спарников, находятся в более благоприятных условиях в смысле сцепления колес с рельсами?
6. По какой формуле может определяться коэффициент трения между колесами и рельсами для электротепловоза без спарников?
7. Какой величины получился опытным путем коэффициент сцепления колес с рельсами для электротепловоза Э-Эл-2 и чем объясняется сравнительно малое полученное значение данного коэффициента сцепления?

4. Общее ограничение силы тяги электротепловоза

1. Сколько частных ограничений имеет в общем сила тяги электротепловоза и какие это ограничения?
2. Как определяется на основании частных ограничений общее ограничение силы тяги электротепловоза?
3. Какие частные ограничения обуславливают в результате общие ограничения силы тяги и мощности электротепловоза Э-Эл-2?
4. В чем заключается эксплуатационное значение ограничений силы тяги электротепловоза Э-Эл-2 по сцеплению и по генератору?

III. РАСХОД ТОПЛИВА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗОМ

1. Из каких частных расходов топлива складывается полный расход топлива тепловозом?
2. Как определяется основной расход топлива дизелем (главным двигателем) тепловоза?
3. Как определяются величины наполнений дизеля на различных фиктивных уклонах и на площадке?
4. Как определяется расход топлива дизелем на протяжении какого-либо участка пути?
5. Как определяется дополнительный расход топлива (двигателем холодильника и пр.)?

IV. ОТДАЧА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗОМ

1. Как определяется отдача тепловоза?
2. Произведение скольких и каких именно основных коэффициентов полезного действия представляет собой отдача электротепловоза?
3. Произведение скольких и каких именно частных коэффициентов полезного действия представляет собой коэффициент полезного действия дизеля?
4. Произведение скольких и каких именно частных коэффициентов полезного действия представляет собой коэффициент полезного действия электрической передачи?
5. Какую величину в общем составляет отдача электротепловоза?
6. Каковы кривые отдачи электротепловоза Э-Эл-2?
7. Какой величины у электротепловоза Э-Эл-2 наивыгоднейшее с точки зрения достижения наибольшей величины отдачи наполнение (форсировка) дизеля и при каком числе оборотов последнего?
8. Оказывает ли какое-либо влияние на отдачу электротепловоза Э-Эл-2 наличие ограничения мощности по сцеплению и по генератору?

V. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА ПРИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГЕ

1. Кто более инертен: электротепловоз или паровоз?
2. Какой величины коэффициенты инертности для электротепловоза и паровоза?
3. Почему для электротепловоза коэффициент инертности больше, чем для паровоза и вагонов?
4. Как определяется общий для всего поезда коэффициент инертности, когда известны коэффициенты инертности для электротепловоза и вагонов?
5. В каких пределах в зависимости от веса поезда варьирует коэффициент инертности товарного груженого поезда при электротепловозной тяге?
6. Возможно ли в выражении уравнения поезда для электротепловозной тяги сохранение величины 120 ускорения поезда в километрах в час за час при равнодействующей силе 1 кг/т ? В общем возможно ли при электротепловозной тяге пользование выражением уравнения поезда того же вида, что и при паровозной тяге?

VI. ВЕС СОСТАВА ПОЕЗДА ПРИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЗНОЙ ТЯГЕ

1. Сохраняют ли свой вид при тепловозной тяге формулы для определения наибольшего возможного веса состава поезда, установленные для паровозной тяги?
2. Какая должна приниматься в расчет сила тяги тепловоза для определения наибольшего возможного веса поезда при электротепловозной тяге?
3. Какая должна приниматься в расчет скорость движения поезда для определения наибольшего возможного веса поезда при электротепловозной тяге?
4. Возможно ли при электротепловозной тяге допущение в исключительных случаях преодоления коротких подъемов круче руководящего подъема? Если возможно, то при каком условии?

VII. ПОВЕРКА ТЯГОВЫХ МОТОРОВ НА НАГРЕВАНИЕ

1. К чему в общем сводится вопрос проверки тяговых моторов на нагревание?
2. Какими методами производится проверка тяговых моторов на нагревание и в зависимости от чего применяется тот или иной метод?

А. Метод эквивалентного тока

1. Что кладется в основу расчетов нагревания тяговых моторов?
2. Как определяется вообще величина эквивалентного тока?
3. Что представляет собой в общем эквивалентный ток?
4. На чем основан „метод эквивалентного тока“ проверки тяговых моторов на нагревание?
5. Как определяется величина эквивалентного тока в тяговых моторах при прохождении поездом ряда элементов пути различного профиля?
6. В чем в результате заключается „метод эквивалентного тока“ проверки тяговых моторов на нагревание?
7. Какой принимается на практике запас для эквивалентного тока при проверке тяговых моторов на нагревание?
8. В каких случаях допустимо пользование для проверки тяговых моторов на нагревание „методом эквивалентного тока“?
9. Каким способом получается кривая зависимости силы тока от скорости движения электротепловоза?

Б. Метод непосредственного определения нагревания моторов

а) Нагревание вообще однородного твердого тела

1. Как аналитически выражается тепловой баланс, имеющий место во всяком процессе нагревания тела?
2. По каким формулам в результате определяется величина сверхтемпературы, которую по истечении некоторого времени получает нагревающееся тело, в случае, если оно при начале нагревания уже имело некоторую сверхтемпературу, и в случае, если оно таковой сверхтемпературы не имело?
3. Что такое тепловая „постоянная времени“ мотора, что она собой представляет и какова ее размерность?
4. Какой вид имеет кривая нагревания тела в случае отсутствия в последнем сверхтемпературы при начале нагревания, каково уравнение этой кривой, какого рода кривую она собой представляет и каковы ее свойства?

5. Пригодны ли формулы, служащие для определения сверхтемпературы тела при нагревании, к определению сверхтемпературы и при охлаждении? Если пригодны, то почему?
6. Что представляет собой кривая охлаждения тела?

б) Нагревание тяговых моторов

1. Что кладется в основу расчетов нагревания моторов?
2. Какова в общем сверхтемпературная кривая мотора и каким она подчиняется уравнениям?
3. Какой конечный вид имеет сверхтемпературная кривая мотора?
4. Откуда берется величина „постоянной времени“ мотора?
5. Как приближенно определяется величина „постоянной времени“ мотора, если она не дана заводом?

в) Метод непосредственного определения нагревания тяговых моторов

1. Как строится сверхтемпературная кривая тяговых моторов при прохождении поездом некоторого участка пути из элементов разного профиля?
 2. Как определяется абсолютное значение наибольшей достигнутой тяговыми моторами сверхтемпературы при их нагревании? Как устанавливается масштаб сверхтемператур?
 3. До какого момента надо доводить расчет при проверке тяговых моторов на нагревание?
 4. От чего зависят величины температур нагревания обмоток якорей, которые могут быть допущены для моторов вообще ж.-д. электродвигателей в эксплуатационных условиях их работы?
 5. Каковы нормы предельной допустимой температуры нагрева в обмотках якорей электромоторов при длительной работе при разных способах измерения температуры?
 6. Как определяется предельная допустимая в каждом отдельном случае величина сверхтемпературы?
 7. Какой величины желательно предвидеть запас температуры нагревания моторов по сравнению с предельной допустимой температурой для моторов ж.-д. электродвигателей при проверке моторов на нагревание „методом непосредственного определения нагревания“?
 8. В каких случаях рекомендуется пользование при проверке тяговых моторов на нагревание „методом непосредственного определения нагревания“?
-

О Г Л А В Л Е Н И Е

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Таблица принятых буквенных обозначений.	5
Введение (§§ 1—5).	9
Теория (§§ 6—35)	15
I. Основное естественное сопротивление электротепловоза (§ 7)	15
II. Сила тяги электротепловоза (§§ 8—17).	17
А. Общие указания (§ 8)	17
Б. Определение разных родов сил тяги (§ 9)	18
1. Дизельная сила тяги (§§ 9—11).	18
а) Сила тяги по режиму дизеля (§ 10).	18
б) Сила тяги по холодильнику (§ 11).	20
2. Машинная сила тяги (§§ 12—15)	25
а) Сила тяги по генератору (§ 13).	25
б) Сила тяги по тяговым моторам (§§ 14-15)	28
3. Сцепная сила тяги (§ 16)	32
4. Общее ограничение силы тяги (§ 17).	34
III. Расход топлива электротепловозом (§§ 18—21)	37
IV. Отдача электротепловоза (§§ 22—24).	42
V. Уравнение движения поезда при электротепловозной тяге (§ 25).	44
VI. Вес состава поезда при электротепловозной тяге (§§ 26—28).	47
VII. Проверка тяговых моторов на нагревание (§§ 29—35) .	50
А. Метод эквивалентного тока (§§ 30—31)	51
Б. Метод непосредственного определения нагревания моторов (§§ 32—35)	55
Контрольные вопросы	66

НБ
УДУНТ
(ДШТ)

ГОСЖЕЛДОРИЗДАТ — КНИГООБЪЕДИНЕНИЕ

ОППЕНГЕЙМ, К. Задачи и вопросы по тяговым расчетам. (Руководство для транспортных втузов.) Стр. 30. Ц. 50 к.

ОППЕНГЕЙМ, К. Проектирование железных дорог. Тяговые расчеты. С 56 фиг. в тексте и 31 в приложении. 3-е изд. значит. перер. и дополн. (Руководство для транспортных втузов.) Стр. 238. Ц. 2 р. 65 к., пер. 40 к.

ОППЕНГЕЙМ, К. Проектирование железных дорог. Тяговые расчеты. С 56 фиг. в тексте и 31 в приложении. 3-е изд. экземпляр с выправленными опечатками. (Руководство для транспортных втузов.) Стр. 239. Ц. 2 р. 60 к., пер. 40 к.

ТОМЛЕНОВ, В. и РЫШКОВ, В. Паровозный котельный ремонт в железнодорожных мастерских Японии. Стр. 187. Ц. 2 р. 50 к., пер. 50 к.

ШИРОКОГОРОВ, Б. Теоретические основы электрической тяги. С 116 черт. и фото в тексте. (Центральный заочный политехнич. ин-т транспорта.) Стр. 137. Ц. 3 р.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ТЯГОЙ формулы и таблицы для предварительных расчетов). Центр. научно-исслед. ин-т транспортного стр-ва НКПС Главжелдорстрой. Стр. 63. Ц. 1 р. 25 к.

Продажа во всех магазинах и отделениях КОГИ. Почтовые заказы направлять: Москва, 64, „Техническая книга почтой“ и Ленинград, проспект 25 Октября, 28. „Дом книги“. Заказы высылаются только наложенным платежом без задатка.

Редактор Е. Фишбейн
Уполн. Главлита Б-31992

Тираж 5150 экз.

Сдано в набор 27/V

Техредактор В. Н. Чернякова.

Зак. тип. 8094

51 408 зн. в п. л.

Подписано к печати 8/VIII—33 г.

5-я типография треста „Полиграфмаш“ Москва, Каланчевский тупик, д. 3/5.

Цена 1 р. 40 коп.



Издания Госжелдориздата
продаются в магазинах
Книгообъединения
ОГИЗа.

Единичные экземпляры
высылают наложенным
платежом

„Книга-почтой“.

Москва, 64.

Сканували: Петренко О.А.
Покровська Т.В.

НБ
УДУНТ
(ДШТ)