

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТНОГО БАЛАНСА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

А. С. АНИКИН
А. М. ДМИТРИЕВ

Энергетическую оценку тяговых машинно-тракторных агрегатов можно дать, лишь составив полный мощностной баланс трактора. Эффективная мощность двигателя N_e при установившемся движении на горизонтальном участке расходуется на механические потери в узлах трансмиссии трактора $N_{тр}$, на самопередвижение трактора N_f , на буксование двигателей N_b , а также мощность, идущую на выполнение работ (тяговая мощность) $N_{кр}$.

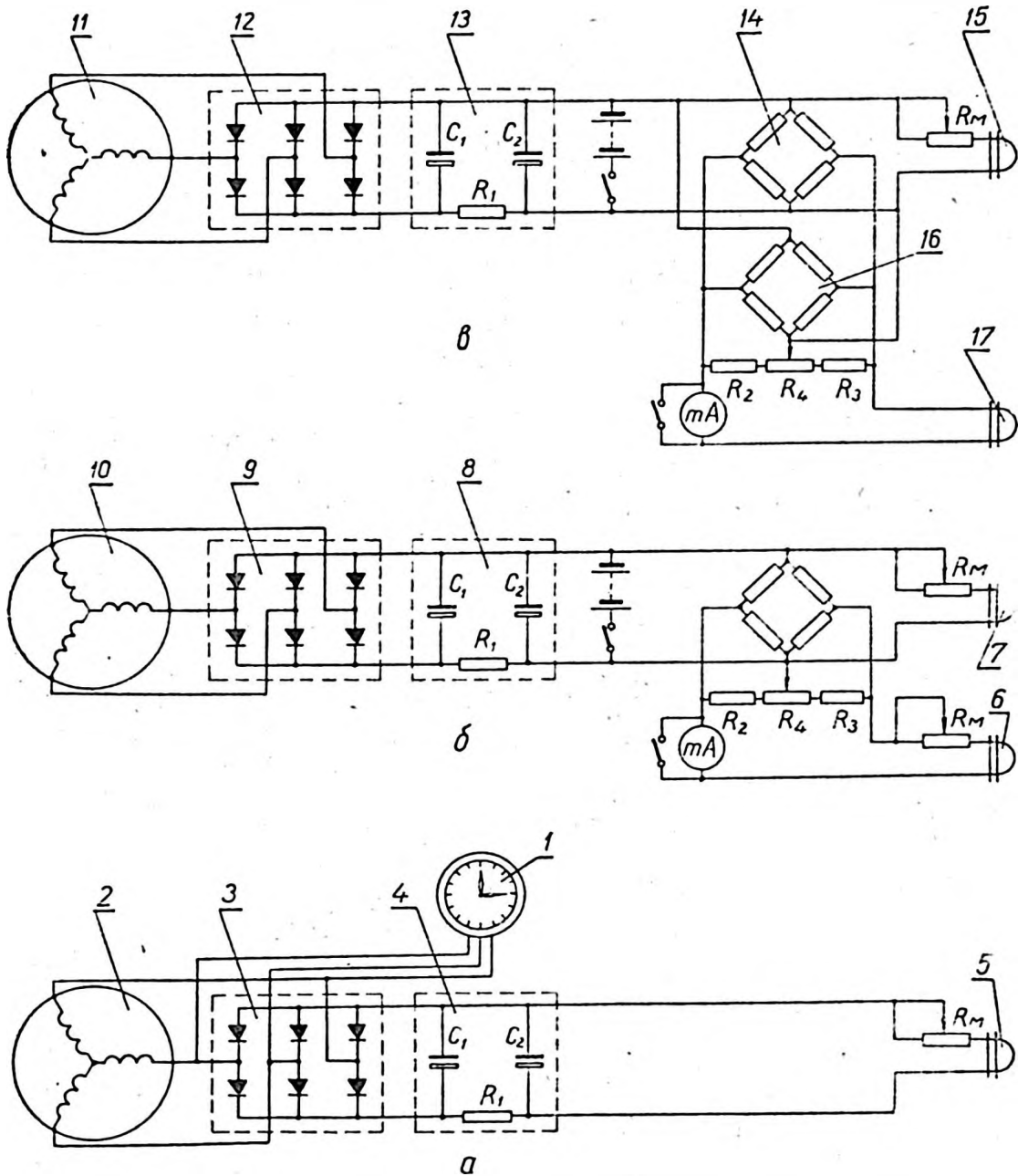
$$N_e = N_{тр} + N_f + N_b + N_{кр}. \quad (1)$$

Проводя энергетические исследования мобильных сельскохозяйственных агрегатов с трактором-макетом МТЗ-80 и скоростным трактором МТЗ-50, мы успешно применяли методику, позволяющую с высокой точностью определять составляющие мощностного баланса и значительно облегчающую обработку экспериментальных данных. Сущность методики заключается в применении электрического умножения силового фактора на скоростной при определении N_k , $N_{кр}$, $N_{вом}$, а также в непрерывной записи текущих значений действительной и теоретической скоростей. Это позволяет определить изменение коэффициента буксования в течение всего процесса динамометрирования. Для визуального контроля за установившемся режимом двигателя использовался указатель числа оборотов I (рис. 1 а). Датчик его — тахогенератор ТЭ-204 (2), приводимый во вращение через гибкий валик от вала топливного насоса. Одновременно через выпрямитель 3 и сглаживающий фильтр 4 ток от тахогенератора поступает на шлейф осциллографа 5 для записи текущего значения числа оборотов коленчатого вала во время опыта.

Предлагаемая методика базируется на применении безусилительной тензометрической аппаратуры с использованием фольговых датчиков, соединенных в мостовые схемы. Сила тока в измерительной диагонали при условии взаимной симметрии плеч и всех рабочих датчиков определяется по формуле:

$$I_g = U \frac{\Delta R}{(R_g + R)R}, \quad (2)$$

где:



Р и с. 1. Принципиальные электрические схемы (а — записи числа оборотов коленчатого вала; б — записи $N_{кр}$ и V_g ; в записи N_k и V_T)

U — напряжение на зажимах питательной диагонали;

ΔR — изменение сопротивления датчиков в результате деформации;

R — сопротивление датчика;

R_g — сопротивление измерительной диагонали (прибора).

При определении тягового усилия тензометрическими звеньями по уравнению (2) устанавливаем, что изменение сопротивления плеч моста ΔR пропорционально тяговому усилию. Если мост питать напряжением, пропорциональным действительной скорости движения машинно-тракторного агрегата, ток в измерительной диагонали будет пропорционален тяговой мощности:

$$N_{кр} = a \cdot I_g = a \cdot U \cdot \Delta R.$$

Подобный метод был использован в ЦНИИМЭСХ нечерноземной зоны при создании аппаратуры для автоматизации тяговых испытаний тракторов (1).

На рис. 1 б приведена принципиальная схема для измерения V_g и $N_{кр}$. Действительная скорость поступательного движения машинно-тракторных агрегатов измерялась с помощью «пятого колеса», оборудованного тахогенератором ТЭ-204. Эффективное значение ЭДС, индуцируемой в обмотке тахогенератора, определяется:

$$E = c \cdot n,$$

где:

c — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции тахогенератора;

n — скорость вращения якоря, об/мин.

Отсюда следует, что вырабатываемое тахогенератором напряжение пропорционально действительной скорости движения агрегата. Якорь тахогенератора приводится во вращение от «пятого колеса» через шестеренчатый редуктор. Передаточное число редуктора $i=10$ выбрано с тем, чтобы получить прямолинейную зависимость напряжения от поступательной скорости агрегата, начиная с $V_g = 1$ м/сек., что соответствует $n=300$ об/мин. при диаметре «пятого колеса» $D_k = 0,628$ м.

Переменное напряжение, вырабатываемое тахогенератором 10, передается на выпрямитель 9 (см. рис. 1 б), состоящий из 6 диодов ДГ=Ц 21, а далее через сглаживающий фильтр 8, состоящий из конденсаторов C_1 и C_2 и сопротивления R_1 (напряжение), подается на шлейф 7 осциллографа чувствительностью 8 мм/ма·м и на зажимы питательной диагонали моста, составленного из 4 фольговых датчиков $R=110$ ом, наклеенных на поверхность кольцевого элемента тягового звена.

Для балансировки моста предусмотрено питание моста от аккумуляторной батареи сопротивления R_2, R_3 , переменное сопротивление R_4 и миллиамперметр, шунтируемый во время записи тяговой мощности на шлейф осциллографа 6, чувствительностью $1500 \frac{мм}{ма \cdot м}$. Чтобы умень-

шить погрешности при измерении действительной скорости движения и тяговой мощности из-за копирования микрорельефа почвы «пятым колесом» и проскальзывания, его устанавливали так, что оно катилось по колее переднего колеса, по уплотненной и выравненной поверхности.

Для определения масштаба записи V_g «пятое колесо» тарировали после установки его на трактор на различных почвенных фонах. На рис. 2 (слева) приведен тарировочный график (кривая 1) «пятого колеса» по грунтовой дороге. По оси ординат отложено среднее значение действительной скорости движения трактора, а по оси абсцисс — средняя ордината осциллограммы. Тарирование устройства для измерения тяговой мощности проводилось в полевых условиях. На тарировочном стенде тяговое звено подвергалось действию нагрузки, величина которой фиксировалась с помощью образцового динамометра ДС-3. Действительная поступательная скорость V_g при этом имитировалась с помощью тахогенератора, приводимого через гибкий валик от коленчатого вала двигателя. По записи на ленте осциллографа определяли ординату V_g и ординату тяговой мощности $N_{кр}$. Установленный ранее масштаб действительной скорости M_v на различных фонах позволяет определить значение действительной скорости. Фактическое значение тяговой мощности определялось расчетным путем:

$$N_{кр} = \frac{P_{кр} \cdot V_g}{270}.$$

На рис. 2 (справа) приведены тарифовочные диаграммы, построенные по данным табл. 1 и 2 тяговых звеньев, для измерения тяговой мощности. По оси ординат отложена величина фактической мощности, а по оси абсцисс — отклонение луча вибратора.

Таблица 1

Тарифовка тяговой мощности (тяговое звено 1)

Усилие на тяг. звене, кг	Ордината действ. скор., мм	Знач. действ. скор. $\frac{\text{км}}{\text{час.}}$	Знач. тяговой мощн., л. с.	Ордината тяговой мощн., мм	Отношение $\frac{N_{кр}}{\eta}$
651,1	17	4,79	11,53	11,5	1
651,1	25	7,05	17,62	17	1,04
651,1	32,5	9,17	22	22,5	0,98
1302,2	16,5	4,65	22,4	21	1,07
1302,2	25	7,05	34	32,5	1,04
1302,2	30	8,46	40,75	38,5	1,06
1953,3	13	3,66	26,5	24,5	1,08
1953,3	20	5,64	40,75	37,5	1,09
1953,3	31,5	8,88	64,25	59,5	1,08
1302,2	15	4,23	20,4	18,5	1,1
1302,2	24	6,77	32,65	30	1,09
1302,2	31	8,74	42,2	39	1,08

Масштаб записи действительной скорости $M_v = 0,282 \frac{\text{км 1 час}}{\text{мм}}$

Таблица 2

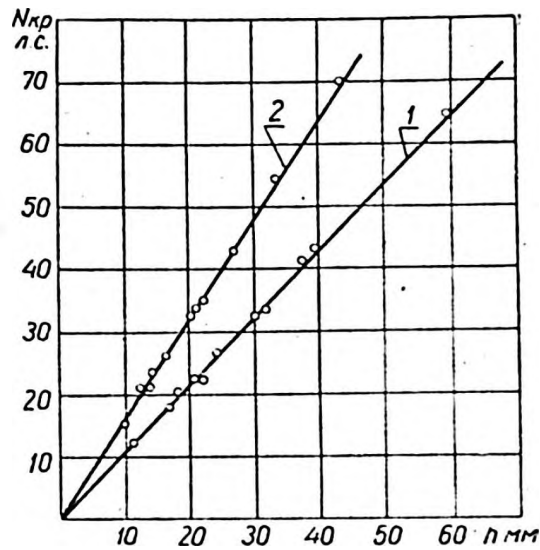
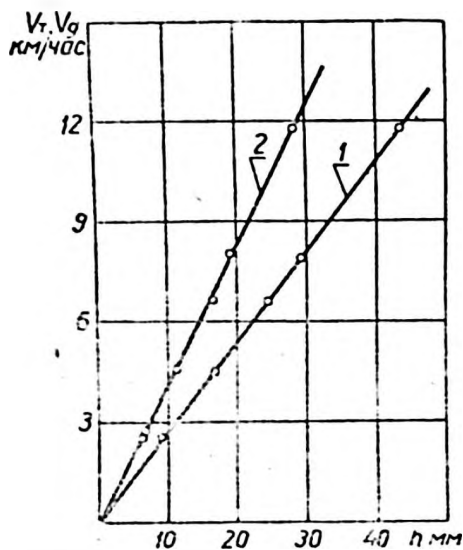
Тарифовка тяговой мощности (тяговое звено 2)

Усилие на тяг. звене, кг	Ордината действ. скор., мм	Знач. действ. скор. $\frac{\text{км}}{\text{час}}$	Знач. тяговой мощн., л. с.	Ордината тяговой мощн., мм	Отношение $\frac{N_{кр}}{\eta}$
651,1	21	6,07	14,63	10	1,46
651,1	30,5	8,83	21,26	15	1,42
1302,2	17	4,92	23,7	15	1,58
1302,2	24,5	7,1	34,2	21,5	1,59
1302,2	31	8,96	43,2	27	1,6
1953,3	16	4,62	33,4	20,5	1,63
1953,3	26	7,52	54,4	33	1,65
1953,3	33,5	9,7	70,2	43,5	2,61
976,5	20	5,78	20,9	13	1,61
976,5	25	7,22	26,05	17	1,53
976,5	34	9,82	35,4	23	1,54

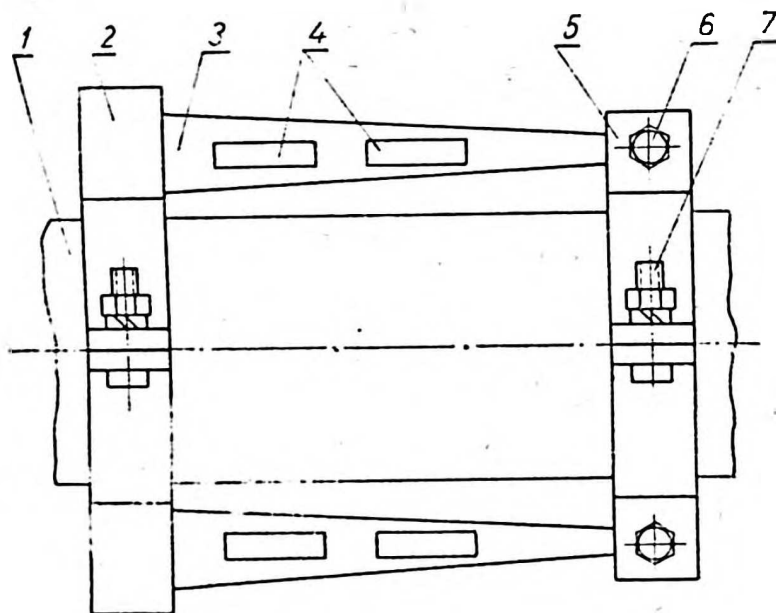
Масштаб записи действительной скорости $M_v = 0,289 \frac{\text{км|час}}{\text{мм}}$

Тарифование устройства для измерения тяговой мощности с приводом тахогенератора от «пятого колеса» во время движения машинно-тракторного агрегата от приведенных тарифовочных диаграмм существенно не отличается.

Чтобы определить изменение мощности на ведущих колесах трактора N_k , использовалось специальное тензометрическое устройство (рис. 3), разработанное нами. По конструкции оно выгодно отличается от ротационных динамометров ВИСХОМа простотой и удобством в пользовании. Устройство состоит из двух обойм 2 и 5, изготовленных из двух половин. Обоймы закрепляются на ведущей полуоси трактора 1 на



Р и с. 2. Тарировочные диаграммы: слева — V_T и V_G (1 — „пятого колеса“ для определения V_G , 2 — устройства для определения V_T); справа — $N_{кр}$ (1 — для тягового звена № 1, 2 — для тягового звена № 2)



Р и с. 3. Электротензометрическое устройство для измерения $M_{кр пр}$ и $M_{кр лев}$ на ведущих полуосях колесного трактора

некотором расстоянии друг от друга, равном длине балочек равного сопротивления 3, стяжными болтами 7. Один конец балочек жестко закрепляется в обойме 2, а второй зажимается микрометрическими винтами 6 в обойме 5. Наклеенные на балочки равного сопротивления фольговые тензодатчики 4 $R=110$ Ом соединены по мостовой схеме. Чтобы устранить влияние изгибающего момента от веса трактора на результат измерения крутящего момента, в устройстве предусмотрены две балочки равного сопротивления, а датчики наклеены таким образом, что изменение сопротивления их от изгибающего момента взаимно компен-

сируется. Величина силы тока в измерительной диагонали моста пропорциональна передаваемому крутящему моменту при $U = \text{const}$.

Чтобы записать на ленту осциллографа мощность на ведущих колесах трактора, необходимо на питательную диагональ моста подавать напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения ведущих колес:

$$N_k = \frac{M_k \cdot \omega_k}{75} = \frac{M_k \cdot n_k}{716,2}.$$

Такая возможность предоставляется, если использовать синхронный вал отбора мощности для привода тахогенератора, с помощью которого записывается теоретическая скорость трактора:

$$n_k = \frac{n_{\text{в.ом.}}}{i},$$

где:

M_k — крутящий момент на ведущих полуосях трактора;

ω_k — средняя угловая скорость вращения ведущих колес трактора;

n_k — среднее значение числа оборотов ведущих колес трактора;

$n_{\text{в.ом.}}$ — обороты вала отбора мощности;

i — передаточное число между ВОМ и ведущими колесами трактора (для трактора-макета МТЗ-80 и трактора МТЗ-50 $i = 16,262$).

Откуда:

$$N_k = \frac{M_k \cdot n_{\text{в.ом.}}}{716,2 \cdot i} A M_k \cdot n_{\text{в.ом.}}$$

На рис. 1 введена принципиальная электрическая схема для записи теоретической скорости движения V_T и мощности, подводимой к ведущим колесам трактора N_k . Якорь тахогенератора 11 приводится во вращение от синхронного ВОМ через гибкий валик. Напряжение, вырабатываемое тахогенератором, через выпрямитель 12 и выравнивающее устройство 13 подается на шлейф осциллографа 15 (для записи теоретической скорости агрегата) и на зажимы питательных диагоналей мостов 14 и 16 тензометрического устройства (для записи N_k на шлейф 17). Тарировка проводилась при ступенчатом нагружении полуосей с помощью двух тарировочных рычагов с плечом $l = 1,5$ м и тали грузоподъемностью 5 т. Нагрузка фиксировалась образцовым динамометром ДС-3. Питание мостов тензометрического устройства осуществлялось от тахогенератора, число оборотов которого менялось от 300 до 1700 об/мин. через интервалы 200 об/мин.

Чтобы определить масштаб теоретической скорости, нужно знать теоретический радиус качения ведущих колес трактора на различных почвенных фонах (предполагается, что радиус качения не зависит от нагрузки на крюке):

$$R_k = \frac{L}{2\pi n_k},$$

где:

L — длина мерного гона, замеренная «пятым колесом»;

n_k — число оборотов ведущих колес трактора при холостом ходе на длине мерного гона, определенного по осциллограмме V_T .

Теоретическую скорость определяем, исходя из длины окружности ведущего колеса, а также величины передаточного числа между ВОМ и ведущими колесами.

$$V_{\tau} = \frac{2\pi R_{к.п.ном}}{i} \cdot \frac{60}{1000} \text{ км/час.} \quad (2)$$

На рис. 2 (слева) приведена тарировочная диаграмма для определения теоретической скорости при движении на грунтовой дороге. На оси абсцисс отложена величина отклонения луча вибратора, а на оси ординат — значение теоретической скорости, подсчитанной по уравнению (2). Имея записи изменений теоретической и действительной скоростей движения агрегата на протяжении всего опыта, можем определить буксование:

$$\delta = \left(1 - \frac{V_g}{V_{\tau}}\right) \cdot 100\%.$$

Мощность, расходуемая на буксование трактора, будет:

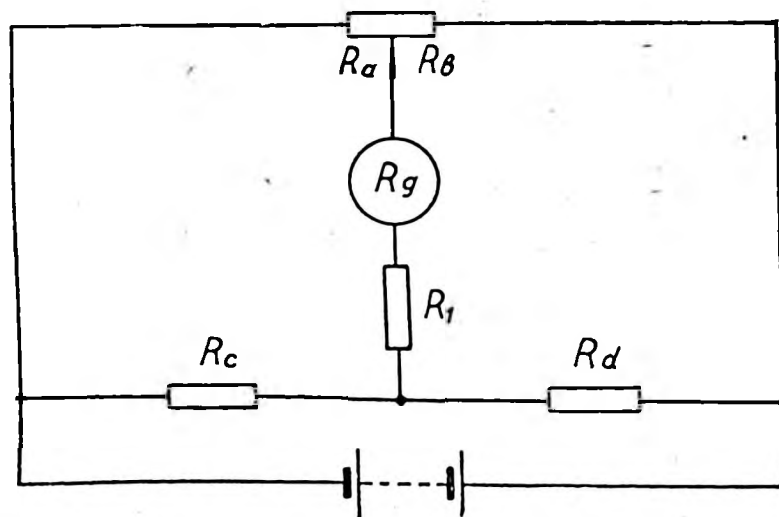
$$N_{\delta} = N_k \cdot \delta.$$

Определение потерь мощности на самопередвижение трактора трудностей не представляет, если известны другие составляющие внешнего мощностного баланса:

$$N_f = N_k - (N_{кр} + N_{\delta}).$$

Определение потерь в трансмиссии трактора всегда связано с определением эффективной мощности двигателя.

При определении эффективной мощности двигателя хорошо зарекомендовал себя в течение двух сезонов реохордный датчик рейки топливного насоса, включенный в мостовую схему. Метод определения основан на том, что степень загрузки двигателя характеризуется положением рейки топливного насоса. На рейке крепится ползунок, а на крышке топливного насоса устанавливается реостат. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 4.



Р и с. 4. Принципиальная электрическая схема реохордного датчика для определения N_e

Если сопротивление плеч реостата при среднем положении ползунка:

$$R_a = R_b = R_c = R_d = R,$$

то сила тока в измерительной диагонали равна:

$$I = U \cdot \frac{\Delta R}{2R(R_g + R_1 + R) - \Delta R^2}, \quad (3)$$

где:

ΔR — изменение сопротивления активных плеч моста.

Как видно из уравнения (3), сила тока в измерительной диагонали изменяется в зависимости от разбаланса нелинейно; но при нарушении балансировки не более чем на 10% сопротивления плеч моста отклонение от линейной зависимости не превышает 1% (2).

Для перемещения ползунка реостата требуется незначительное усилие, которое не нарушает нормальной работы регулятора топливного насоса. Сила тока в измерительной диагонали фиксировалась, как и остальные параметры, на осциллографе Н-700. На рис. 5 (слева) приведен тарировочный график двигателя Д-48 трактора МТЗ-50. На тарировочном графике представлены кривые изменения эффективной мощности двигателя и часового расхода топлива в зависимости от хода рейки топливного насоса.

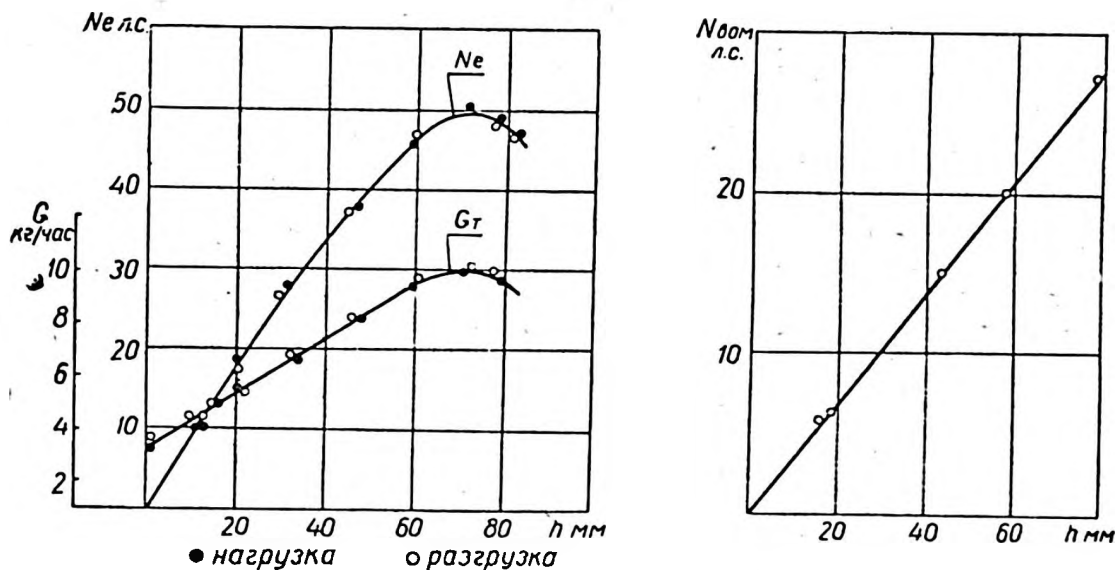


Рис. 5. Тарировочные диаграммы: слева — N_e и часового расхода топлива двигателя Д-48, справа — карданного динамометра для определения $N_{ном}$

Тарировка реохордного датчика производилась при тормозных испытаниях двигателя на тормозном стенде СТЭУ-28; на ленту осциллографа записывалось положение рейки топливного насоса.

Составляя мощностной баланс машинно-тракторных агрегатов, имеющих ротационные активные рабочие органы, необходимо, помимо перечисленных в мощностном балансе (уравнение 1) составляющих, определить и мощность, расходуемую на привод рабочих органов через вал отбора мощности. В настоящее время эта мощность определяется путем измерения крутящего момента с помощью электротензометрических динамометров, а также числа оборотов вала, измеряемых с по-

мощью импульсных датчиков. В данном случае мощность на валу отбора мощности определена расчетным путем:

$$N_{\text{вом}} = \frac{M_{\text{вом}} \cdot n_{\text{вом}}}{716,2},$$

где:

$M_{\text{вом}}$ — крутящий момент на валу отбора мощности в кгм;

$n_{\text{вом}}$ — обороты вала отбора мощности, об/мин.

При измерении $M_{\text{вом}}$ и числа оборотов для определения мощности на валу отбора мощности могут возникнуть значительные погрешности. Относительная суммарная погрешность определится:

$$\epsilon_N = \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3), \quad (4)$$

где:

ϵ_1 — относительная погрешность определения масштаба записи;

ϵ_2 — относительная погрешность измерения ординаты на ленте осциллографа;

ϵ_3 — относительная погрешность определения числа оборотов.

Ошибка измерения мощности на валу отбора мощности может быть значительно уменьшена, если использовать электрическое умножение крутящего момента и числа оборотов. Принципиальная схема для определения $N_{\text{вом}}$ соответствует схеме измерения $N_{\text{кр}}$ (рис. 1 б). Тахогенератор приводится во вращение от вала отбора мощности через редуктор с передаточным числом $i=3,18$ и гибкий вал.

Тарировка динамометра в этом случае проводилась на специальном тарировочном стенде, где для привода динамометра и тахогенератора использовался тарировочный электродвигатель. Это позволило определить мощность непосредственно по ваттметру, включенному в цепь двигателя. Нагрузка на валу динамометра создавалась с помощью механического тормоза, а число оборотов изменялось с помощью коробки перемены передач и сменных шестерен. Результаты тарировки динамометра на мощность представлены на диаграмме (рис 5, справа). По оси абсцисс отложена величина отклонения луча вибратора, а по оси ординат — расчетное значение $N_{\text{вом}}$, определенное по формуле:

$$N_{\text{вом}} = \eta_m \cdot \eta_{\text{э}} \cdot N_{\omega},$$

где:

η_m — КПД коробки перемены передач (две пары шестерен=0,96);

$\eta_{\text{э}}$ — КПД электродвигателя по тарировочной кривой двигателя в зависимости от загрузки;

N_{ω} — мощность по ваттметру.

Тарировка проводилась в диапазоне числа оборотов вала отбора мощности, что уменьшает погрешность тарировки под влиянием неустойчивости переходного сопротивления токосъемного устройства от числа оборотов.

При определении $N_{\text{вом}}$ непосредственно по записи на осциллограмме погрешность измерения обуславливается лишь погрешностью при определении масштаба и отсчете ординаты мощности на осциллограмме; кроме того, при этом облегчается обработка осциллограмм и нет необходимости замерять число оборотов.

Приведенная выше методика основывается на использовании современной тензоаппаратуры и методов электрического умножения двух факторов. Это позволяет значительно снизить процент погрешности при проведении исследований. Так, относительная погрешность при

определении мощности на валу отбора мощности в отличие от выражения (4):

$$\epsilon_N = \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2).$$

Непрерывная запись изменения исследуемых параметров позволяет исследовать не только установившееся движение, но и разгон машинно-тракторных агрегатов; дает более ясную картину взаимосвязи между определяемыми параметрами.

Использование описанных способов определения составляющих мощностного баланса машинно-тракторных агрегатов позволяет значительно сократить время на обработку экспериментальных данных и проведение самих экспериментов. А это, в свою очередь, дает возможность проводить испытания сравниваемых агрегатов в идентичных условиях.