*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института том XXV, выпуск I, 1951 г.*

# КОЭФИЦИЕНТ ОТДАЧИ ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

Доц. *Н. В. Филатов*

## 1. Коэфициент полезного действия и коэфициент отдачи

Эффективность работы механических установок оценивается различными показателями. Весьма важным из них является коэфициент полезного действия (к. п. д.), характеризующий совершенство механизмов.

Практическое значение этого показателя велико. Коэфициент полезного действия дает определенное направление машиностроению и для эксплоатации машин устанавливает оптимальные режимы работы. Он дает возможность судить о выгодности сочетания механизмов и вносит значительное упрощение в расчетные и проектные работы. Так, например, основываясь на значениях к. п. д., во многих случаях подшипники скольжения были заменены подшипниками качения, паровые и тепловые двигатели — электродвигателями, работа вентиляторов принимается в соответствии с наивысшими значениями его к. п. д. и т. д.

В общей теории машин механический коэфициент полезного действия определяется отношением абсолютных величин работы полезных сопротивлений к работе всех движущих сил, вычисленных для периода установившегося движения. Таким образом, нахождение к. п. д. связано, во-первых, с выяснением того, что называть работой сил полезного сопротивления, а, во-вторых, с учетом работы, производимой только во время движения с постоянной скоростью.

Проанализируем эти положения применительно к транспортным машинам и к машинам, не имеющим постоянной скорости.

Во многих случаях, несмотря на кажущуюся простоту вопроса, не всегда легко установить, какие сопротивления следует считать полезными. Особенная трудность возникает в тех случаях, когда механизмы служат для перемещения груза. Поэтому авторы по-разному определяют к. п. д. транспортных установок. Одни авторы считают работой полезных сопротивлений транспортной машины вертикальное перемещение груза; другие — работу трения, вызванную движущимся грузом.

Как первое, так и второе предположения ошибочны: во-первых, ни в одном из них не учитывается скорость перевозки груза, являющаяся важным фактором полезного эффекта транспорта; во-вторых, оба предположения отвечают частным случаям: *а)* перемещению груза с постоянной скоростью и *б)* вертикальному перемещению без трения или горизонтальному с трением.

По первому предположению невозможно определить к. п. д. при горизонтальном движении, т. к. при этом исчезает *полезная работа.* Второе вообще приводит к абсурду. Если за полезную работу примем расход энергии на преодоление трения, то получим тем больший к. п. д. машины, чем больше в ней трения, т. е. чем менее совершенна машина. Примером такого случая может служить к. п. д. ленточного и скребкового транспортеров, работающих в одинаковых условиях. Скребковый

транспортер затрачивает больше энергии на преодоление трения груза о желоб, чем ленточный на преодоление трения, вызванного грузом в роликах, поддерживающих ленту. Если полезным сопротивлением считать трение, то к. п. д. скребкового транспортера будет выше к. п. д. ленточного. Однако известно, что полная мощность первого больше второго, несмотря на их одинаковый транспортный эффект.

Между тем, полезное действие в транспорте может определяться работой, предназначенной для различных условий перевозки. Например: изменение геодезического уровня в продолжение заданного времени или без учета времени, перевозка по сложному профилю по заданной техограмме, транспортирование без свободного выбега или с переменной скоростью. Примерами могут служить установки: подъемники, транспортеры, ленточные метательные машины, качающиеся конвейеры и т. д. В одних случаях кинетическая энергия, сообщенная грузу в начале движения, при разгрузке пропадает, в других случаях она используется для торможения или метания, в третьих — вообще возможна работа только при неравномерном действии установки и т. д.

Современная техника стоит на таком уровне, при котором для получения полезного эффекта от машин различного назначения требуется производство целого ряда операций переменного режима: от двигателей — передача энергии по заданному закону, от трансформирующих машин — изготовление изделия сложной формы, от транспортирующих машин — перевозка груза по заданной тахограмме при том или ином профиле пути. Таким образом, существующее понятие к. п. д. неприемлемо для оценки совершенства многих видов машин.

Современные машины работают циклами, поэтому установившееся движение теперь следует понимать не как движение с постоянной скоростью, а как цикличное. Тогда постоянство скорости будет частным режимом машины, а их к. п.д. будет характеризовать частные условия работы. Для оценки совершенства машины необходимо иметь показатель, охватывающий работу всего цикла. Таким всеобщим показателем, вычисленным для одного цикла работы, является коэфициент отдачи (к. о.), определяющийся отношением энергии, отданной машиной на создание полезного эффекта, к затраченной энергии.

Чтобы найти математическое выражение коэфициента отдачи, составим уравнение работы всех сил, действующих в машине:

$$T - A - B - C = 0, \tag{1}$$

где

$T$ — затраченная работа,

$A$ — работа сил динамического сопротивления,

$B$ — работа сил статического сопротивления,

$C$ — работа сил сопротивления холостого хода.

Очевидно, в полезную работу не могут входить потери холостого хода, определяемые слагаемым $C$. Остальные слагаемые входят в состав полезной работы, поэтому для полезной работы можно написать равенство в общем виде:

$$T = A + B.$$

Затраченная работа равна:

$$T = A + B + C.$$

Отсюда общий вид к. о. установок:

$$\eta_0 = \frac{T_п}{T} = \frac{A+B}{A+B+C} \tag{2}$$

Рассмотрим это выражение применительно к различным установкам: двигателям и трансмиссиям, трансформирующим и транспортирующим машинам.

Полезная работа двигателей и трансмиссий определяется замером или заданием внешней механической работы, равной $A+B$.

Полезной работой трансформирующих установок является работа сил сопротивления обрабатываемого материала. Так, например, полезная работа строгального станка за время обработки изделия (цикл $t_ц$) равна:

$$T = A + B = P v t_ц,$$

где

$P$ — сила сопротивления материала резанию;

$v$ — скорость резания.

За это же время затрачивается энергии:

$$T_ц = (N_п + N_х)\, t_ц,$$

где

$N_п = \frac{T_п}{t_п}$ — полезная мощность;

$N_х$ — мощность холостого хода.

Коэфициент отдачи станка при постоянном режиме резания:

$$\eta_о = \frac{T_п}{T} = \frac{Pv}{Pv + N_х}$$

Если режимы резания в течение цикла переменны, к. о. следует рассчитывать по работе за цикл:

$$\eta_о = \frac{\Sigma T_{пi}}{\Sigma T_i}$$

При определении коэфициента отдачи установки, служащей для перемещения груза, необходимо учесть, что в идеальных случаях перевозки трение должно отсутствовать. Тогда полезный эффект транспорта будет достигаться работой, затрачиваемой на преодоление сил инерции груза и тяжести. В таком случае полезный результат работы транспортных установок определится тремя заданными условиями: 1) изменением геодезической отметки, отвечающим работе силы тяжести; 2) перемещением заданного количества груза из одной точки трассы в другую с заданной скоростью без учета разности геодезических отметок, что отвечает кинетической энергии груза; 3) перемещением заданного количества груза из одной точки в другую с учетом скорости и разности отметок между начальной и конечной точками трассы, что отвечает сумме кинетической и потенциальной энергий груза.

Для локомотива, например, полезная работа равна произведению силы тяги на сцепке на путь движения и может быть выражена как сумма кинетической энергии состава вагонов и работы его статических сопротивлений за полное время движения. При расчете затраченной энергии машинами, выполняющими заданный режим перевозки по сложной тахограмме, в полную работу должна включаться также энергия, израсходованная на торможение и потери в механизме привода.

В общем виде полезная работа транспортных установок выразится так:

$$T_п = A_п + B_п = \frac{G\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2g} - G L \cos\beta, \qquad (3)$$

где

$G$ — вес груза,

$v_1$ — скорость груза в момент погрузки на машину,

$v_2$ — максимальная скорость движения груза,

$\beta$ — угол давления силы тяжести,

$L$ — длина транспортирования.

По первому условию полезным эффектом является изменение геодезического положения груза, тогда полезная работа будет равна:

$$T_{\text{п}} = -G\,L\cos\beta.$$

Этот случай отвечает подъему груза ручными лебедками, домкратами и тому подобными устройствами, работающими при малых скоростях. Подъем сопровождается расходом энергии, а спуск — возвратом (рекуперацией) энергии.

По второму условию полезным эффектом является перемещение груза, без учета изменения геодезического уровня (локомотивная откатка). Мерой такого движения является кинетическая энергия груза, равная в этом случае полезной работе. Этот вид работы связан с расходом энергии, равным сумме работ всех внешних сил:

$$T_{\text{п}} = \frac{G\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2g} > 0.$$

Третье условие отвечает равенству (3) и может встретиться при расчете передвижных кранов и других подобных подъемно-транспортных установок.

Затраченная работа во всех случаях определится равенством:

$$T = \frac{G\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2g} + G\,L\,(f\sin\beta - \cos\beta) + f_{\text{х}}\,GL, \tag{4}$$

где

$f$ — коэфициент трения поверхностей, трущихся под воздействием груза,

$f_{\text{х}}$ — коэфициент сопротивления движению холостого хода, отнесенный к полезному грузу машины.

Затраченная работа при спуске груза может получать отрицательный знак при малых значениях: скорости, угла $\beta$ и коэфициентов трения.

Согласно формулам (2) и (3) к. о. транспортной установки в общем виде может быть записан:

$$\eta_{\text{о}} = \frac{T_{\text{п}}}{T} = \frac{G\,\dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - G\,L\cos\beta}{G\,\dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + GL\,(f\sin\beta - \cos\beta + f_{\text{х}})} \tag{5}$$

**или**

$$\eta_{\text{о}} = \frac{\dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - L\cos\beta}{\dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + L\,(f\sin\beta - \cos\beta + f_{\text{х}})}. \tag{6}$$

При $v_1 = 0$ общий вид к. о. следующий:

$$\eta_0 = \frac{\frac{v_2^2}{2g} - H}{\frac{v_2^2}{2g} + L(f \sin\beta - \cos\beta + f_x)}$$

где

$H$ — высота подъема груза.

Из приведенных уравнений видно, что к. о. агрегата равен отношению средней величины силы тяги, необходимой для преодоления инерции груза и его веса, к средней величине полной силы тяги. Следовательно, чем больше абсолютное значение к. о., тем выше эффект механизма в данных условиях. Знаки к. о. указывают на различные направления силы тяги и на ее величину относительно силы трения. При движении за счет силы тяжести без затраты энергии к. о. равен бесконечности: $\eta_0 = \infty$. Во всех случаях, когда сила тяги больше силы трения и при рекуперации энергии, к. о. положителен: $\eta_0 > 0$. В случаях тяги или торможения силой, меньшей силы трения, к. о. отрицателен: $\eta_0 < 0$.

Машины, имеющие сложный скоростной режим, в течение цикла имеют разные знаки к. о. В течение одного цикла шахтная подъемная установка может иметь следующие знаки к. о.: 1) во время подъема с ускорением и с постоянной скоростью $\eta_0 > 0$, 2) во время подъема с замедлением при включенном двигателе $\eta_0 < 0$, 3) во время спуска и подъема при выключенном двигателе $\eta_0 = \infty$. Все режимы при рекуперации энергии и при противотоке имеют $\eta_0 > 0$. При спуске с постоянной скоростью и включенном двигателе $\eta_0 \leqslant 0$.

Чтобы получить представление об эффективности работы шахтной подъемной машины, необходимо подсчитать среднее значение ее к. о.

Таким образом, к. о. характеризует не только совершенство машин, но и динамические условия. Коэфициент полезного действия такими свойствами не обладает.

Если между двумя точками находится несколько трасс, то при равных $v$, $f$ и $f_x$ на наиболее короткой трассе потери от трения будут наименьшими, а к. о. — наибольшим. Если однотипные горизонтальные установки имеют разную длину, то при равных $v$, $f$ и $f_x$ наиболее короткая установка будет иметь наивысший к. о., т. к. транспортирование на ней производится в течение наиболее короткого времени при наименьшей работе трения. При одинаковых $f, f_x$ и $t$ к. о. однотипных горизонтальных установок не зависят от длины и равны между собой, т. к. увеличение длины в таком случае увеличивает не только работу трения, но и скорость, что повышает кинетическую энергию.

Рассмотренная оценка работы механизмов может быть распространена и на гидравлический транспорт, для которого к. о. будет следующим:

$$\eta_0 = \frac{h_д + h_г}{h_д + h_г + h_c}$$

где

$h_д$ — динамический напор,

$h_г$ — геодезический напор,

$h_c$ — статический напор.

## 2. Кинетический и потенциальный к. о.

Если при спуске груза необходима скорость $v$, то полезная работа при $\beta = 90° - \alpha$ будет:

$$T_{\text{п}} = \frac{v^2}{2g} - L\cos(90° - \quad) = \frac{}{2g} - L\sin\alpha.$$

Коэфициент отдачи в этом случае равен:

$$\eta_{\text{о}} = \frac{v^2 - 2gL\sin\alpha}{v^2 + 2gL(f\cos\alpha - \sin\alpha)} \tag{7}$$

или

$$\eta_{\text{о}} = \frac{v^2 - v_{\text{св}}^2}{v^2 - v_{\text{св}}^2 + 2gLf\cos\alpha},$$

где

$v_{\text{св}} = \sqrt{2gL\sin\alpha}$ — скорость свободного падения на высоту $H = L\sin\alpha$.

Числитель выражения (7) — разность квадратов необходимой скорости к получаемой за счет действия силы тяжести при свободном падении. Знаменатель — алгебраическая сумма квадратов скоростей — необходимой и получаемой за счет падения на высоту $H$ под действием тяжести и силы трения.

Выражение (3) включает два вида полезной работы: работу движения — кинетическую энергию — и работу изменения геодезического уровня — потенциальную энергию. На основании этого кинетический коэфициент отдачи установки выразится так:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{G\left(v_2^2 - v_1^2\right)}{2gT} \tag{8}$$

где

$T$ — полный расход энергии;

потенциальный коэфициент отдачи —

$$\eta_{\text{п}} = \frac{-GL\cos\beta}{T} \tag{9}$$

Тогда полный к. о. будет равен сумме кинетического и потенциального к. о.:

$$\eta_{\text{о}} = \eta_{\text{к}} + \eta_{\text{п}}. \tag{10}$$

В качестве примера найдем значение к. о. наклонной поверхности, наклоненной под углом $\alpha$ к горизонтали, если требуется поднять груз на высоту $H = L\sin\alpha$, при очень малой скорости $v \approx 0$.

Пользуясь выражением (6), при $\beta = 180° - (90° - \quad) = 90° +$ и $f = 0$, получим:

$$\eta_{\text{о}} = \frac{-L\cos(90° + \alpha)}{L\left[f\sin(90° + \alpha) - \cos(90° + \alpha)\right]}$$

или

$$\eta_{\text{о}} = \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{ctg}\alpha + 1}$$

где

$\varphi$ — угол трения.

Последнее выражение есть не что иное, как к. п. д. наклонной плоскости. Следовательно, при малых скоростях к. о. и к. п. д. наклонной плоскости равны между собой. Если необходимо принять во внимание скорость подъема, то к. о. наклонной плоскости будет определяться равенством (7) или (6).

На основании равенства (8) кинетический к. о. является отношением средней за цикл динамической силы двигателя, необходимой для преодоления инерции груза, к средней величине полной силы тяги двигателя.

На основании выражения (9) потенциальный к. о. равен отношению силы, необходимой для преодоления веса груза (без учета трения), к средней величине полной силы тяги двигателя.

Абсолютное значение $\eta_к$ и $\eta_п$ указывает на величину полезной работы, т. е. на совершенство машины. Знаки указывают на динамические условия:

$\eta_п > 0$ во всех случаях, когда сила тяги направлена вверх;

$\eta_п < 0$ во всех случаях, когда сила тяги направлена вниз;

$\eta_п = 0$ при движении по горизонтали с включением двигателя на любой режим;

$\eta_п = \infty$ и $\eta_к = \infty$ при отсутствии расхода энергии;

$\eta_к < 0$ при включении двигателя на тормозной режим;

$\eta_к > 0$ при двигательном режиме с ускорением;

$\eta_к = 0$ при режиме постоянной скорости.

Следовательно, знаки потенциального к. о. указывают на направление силы тяги (вверх, вниз, по горизонтали), а знаки кинетического к. о. — на скоростной режим и на расход или возврат энергии.

Для повышения к. о. необходимо учесть следующее: *а)* все виды к. о. повышаются от уменьшения работы трения; *б)* увеличение скорости повышает кинетический и понижает потенциальный к. о.; *в)* увеличение $\cos\beta$ повышает потенциальный к. о. во всех случаях, а кинетический повышает только при спуске и понижает только при подъеме; *г)* возрастание полного к. о. зависит от изменения суммы кинетического и потенциального коэфициентов отдачи.

Различные к. о. могут потребоваться в различных случаях. В шахтном, например, подъеме необходимо учитывать все три вида к. о. В электровозной откатке чаще всего необходимо учитывать кинетический к. о. В домкратах имеет значение потенциальный к. о. В грейферных кранах следует учитывать все три к. о., а в монтажных кранах — только потенциальный к. о.

*ПРИМЕР 1.* Скребковый и ленточный транспортеры одинаковой длины работают на подъем с разностью отметок $h = 4$ *м*, при одинаковой скорости $v = 1{,}5$ *м/сек* и с одинаковой производительностью $Q = 120$ *т/час*. При работе на подъем полная мощность скребкового транспортера равна $N = 7$ *л. с.*, полная мощность ленточного транспортера $N = 3$ *л. с.* При горизонтальных условиях скребковый транспортер развивает мощность $N = 5$ *л. с.*, а ленточный — 1,5 *л. с.* Найти к. о. установок.

При работе на подъем к. о. скребкового транспортера будет:

$$\eta_о = \eta_к + \eta_п = \frac{Qv^2t}{2gN\,3{,}6} + \frac{Qht}{3{,}6N} = \frac{120 \cdot 1{,}5^2\ 1}{2\ \ 9{,}81\ \ 3{,}6\ \ 6{,}75\ \ 7} +$$

$$+ \frac{120\ \ 4\ \ 1}{3{,}6\ \ 75\ \ 7} = 0{,}261.$$

При работе ленточного транспортера на подъем к. о. будет:

$$\eta_0 = \eta_к + \eta_п = \frac{120 \quad 1{,}5^2 \quad 1}{2 \quad 9{,}81 \quad 3{,}6 \quad 75 \quad 3} + \frac{120 \quad 4 \quad 1}{3{,}6 \quad 75 \quad 3} = 0{,}611.$$

Работа скребкового транспортера при горизонтальных условиях происходит при к. о.:

$$\eta_0 = \eta_к \quad \frac{120 \quad 1{,}5^2 \quad 1}{2 \quad 9{,}81 \quad 3{,}6 \quad 75 \quad 5} = 0{,}01.$$

Сравнивая результаты расчета, заметим, что ленточный транспортер выгоднее скребкового при горизонтальных условиях в 2 раза, а при работе на подъем в 3 раза.

Метод оценки работы машин с помощью к. о. может быть распространен и на гидравлический и пневматический транспорты. Для этих видов транспорта к. о. будет следующим:

$$\eta_0 = \eta_к + \eta_п = \frac{h_д + h_г}{h_д + h_г + h_с}$$

где
$h_д$ — динамический напор,
$h_г$ — геодезический напор,
$h_с$ — статический напор.

### 3. Коэфициент отдачи комплекса машин

Двигатели и трансмиссии могут передавать энергию при параллельной и последовательной работе. Исполнительные машины (транспортирующие и трансформирующие) по расходу энергии и по трансформации могут соединяться только в параллельные схемы.

Если принять:
$N_1, t_1$ и $\eta_{0_1}$ — мощность, время работы и к. о. первой машины,
$N_2, t_2$ и $\eta_{0_2}$ — мощность, время работы и к. о. второй машины,
$N_3, t_3$ и $\eta_{0_3}$ — мощность, время работы и к. о. третьей машины,
$N_m, t_m$ и $\eta_{0_m}$ — мощность, время работы и к. о. последней машины,
то к. о. последовательной и параллельной цепи можно написать следующим образом:

для последовательной цепи —

$$\eta_0 = \eta_{0_1}\,\eta_{0_2}\,\eta_{0_3} \qquad \eta_{0_m} = \frac{T_{u_m}}{T} \tag{11}$$

для параллельной цепи —

$$\eta_0 = \frac{N_1 t_1 \eta_{0_1} + N_2 t_2 \eta_{0_2} + N_3 t_3 \eta_{0_3} + \quad + N_m t_m \eta_{0_m}}{N_1 t_1 + N_2 t_2 + N_3 t_3 + \quad + N_m t_m} \tag{12}$$

Иначе говоря, к. о. последовательной цепи комплекса машин равен отношению полезной работы последней машины к энергии, затраченной в первой машине, а к. о. комплекса машин, работающих параллельно, равен сумме полезных работ всех машин к сумме затраченной энергии всеми машинами.

Выражение (12) для транспортных комплексов может применяться независимо от того, как располагаются машины относительно друг друга.

Для транспортных установок следует учесть следующее. Если несколько установок последовательно транспортируют какой-либо груз весом $G$, то работа подъема каждой машины будет равна:

$$T_{п_1} = Gh_{0 \div 1} = GL_{0 \div 1} \cos \beta_1,$$
$$T_{п_2} = Gh_{1 \div 2} = GL_{1 \div 2} \cos \beta_2,$$
$$T_{п_3} = Gh_{1 \div 3} = GL_{1 \div 3} \cos \beta_3,$$

$$T_{п_m} Gh_{(m-1) \div m} = GL_{(m-1) \div m} \cos \beta_m,$$

где

$h_{0 \div 1}$ — высота подъема от нулевого до первого пункта;

$h_{1 \div 2}$ — высота подъема второй установки от первого до второго пункта и т. д.;

$L_{0 \div 1}$ и $\beta_1$ — длина трассы и угол давления силы тяжести первой установки;

$L_{1 \div 2}$ и $\beta_2$ — длина трассы и угол давления силы тяжести второй установки и т. д.

Общая полезная работа подъема равна сумме полезных работ подъема отдельных машин:

$$T_п = T_{п_1} + T_{п_2} + \quad + T_{п_m}$$

или

$$T_п = G\left(h_{0 \div 1} + h_{1 \div 2} + \quad + h_{(m-1) \div m} = GH,\right.$$

где

$H$ — полная высота подъема.

Работа динамических сопротивлений каждой из машин равна:

$$G \frac{\left(v_2^2 - v_1^2\right) i}{2g}$$

где разность квадратов скоростей груза относится к каждой машине в отдельности.

Тогда полная динамическая работа всех машин будет равна:

$$\frac{G}{2g} \Sigma \left(v_2^2 - v_1^2\right) i.$$

Вся затраченная работа выразится так:

$$T = \Sigma T_i = \frac{G}{2g} \Sigma \left(v_2^2 - v_1^2\right) + G \Sigma L_i (f \sin \beta - \cos \beta + f_x) i.$$

Кинетический к. о. всего комплекса машин равен:

$$\eta_к = \frac{G \Sigma \left(v_2^2 - v_1^2\right) i}{2g \Sigma T_i}$$

Потенциальный к. о. всего комплекса машин будет:

$$\eta_п = \frac{-GH}{\Sigma T_i}$$

Полный к. о. всего комплекса установок:

$$\eta_о = \eta_к + \eta_п$$

или

$$\eta_0 = \frac{G\left[\frac{\Sigma\left(v_2^2 - v_1^2\right) i}{2g} - H\right]}{\Sigma T_i}$$

Во всех тех случаях, когда перегрузка с одного агрегата на другой происходит при нулевой скорости, к. о. равен:

$$\eta_0 = \frac{\frac{G}{2g}\Sigma v_i^2 - GH}{\frac{G}{2g}\Sigma v_i^2 + G\Sigma L_i (f \sin\beta_i - \cos\beta + f_x) i}$$

В тех случаях, когда перегрузка происходит при установившейся скорости $v$, во втором агрегате затрата кинетической энергии равна нулю, и к. о. второго агрегата равен:

$$\eta_0 = \frac{-Gh_2}{GL_2 (f \sin\beta - \cos\beta + f_x) i}$$

Общий к. о. двух смежных установок — первой ускоряющей и второй транспортирующей — равен:

$$\eta_0 = \frac{G\frac{v^2}{2g} - GH}{G\frac{v^2}{2g} + G\Sigma L_i (f \sin\beta - \cos\beta + f_x) i}$$

Таким образом, к. о. комплекса транспортных машин определяется по способу расчета к. о. машин, работающих параллельно при любой схеме движения груза:

$$\eta_0 = \frac{\Sigma (\eta_{0i} N_i t_i)}{\Sigma (N_i t_i)} \qquad (13)$$

Отсюда следует, что для установок, работающих на переменных режимах (шахтный подъем, качающийся конвейер), к. о. можно находить по последнему уравнению, где мощности $N_i$, продолжительности $t_i$ и к. о. берутся для отдельных периодов. Так, например, к. о. установок, работающих по трапецоидальной тахограмме, определяется так:

$$\eta_0 = \frac{\eta_{01}\int_0^{t_1} N_1\, dt + \eta_{02} N_2\, t_2 + \eta_{03}\int_{t_2}^{t_3} N_3\, dt}{\int_0^{t_1} N_1\, dt + N_2\, t_2 + \int_{t_2}^{t_3} N_3\, dt}$$

Индекс 1 отвечает ускоренному движению, индекс 2 — движению с постоянной скоростью, индекс 3 — движению с замедлением.

*ПРИМЕР 2.* Найти к. о. комплекса машин, установленных по схеме на рис. 1 при следующих условиях:

$N_1, N_2, N_3 \ldots N_6$ — мощности машин;

$\eta_{к_1}, \eta_{к_2}, \eta_{к_3} \ldots \eta_{к_6}$ — кинетические к. о. установок;

$\eta_{п_1}, \eta_{п_2}, \eta_{п_3} \ldots \eta_{п_6}$ — потенциальные к. о. машин;

$\eta_{0_1}, \eta_{0_2}, \eta_{0_3} \ldots \eta_{0_6}$ — полные к. о. машин;

$t_1, t_2, t_3 \ldots t_6$ — продолжительность движения груза на машинах.

Кинетический к. о. всего комплекса машин

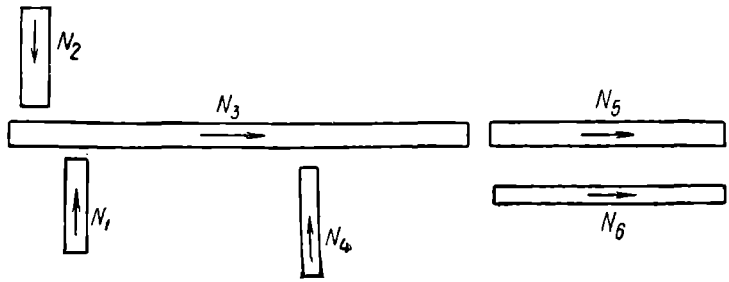
$$\eta_к = \frac{N_1 t_1 \eta_{к_1} + N_2 t_2 \eta_{к_2} + \quad + N_6 t_6 \eta_{к_6}}{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \quad + N_6 t_6}$$

Потенциальный к. о. всей схемы транспортных машин

$$\eta_п = \frac{N_1 t_1 \eta_{п_1} + N_2 t_2 \eta_{п_2} + \quad + N_6 t_6 \eta_{п_6}}{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \quad + N_6 t_6}$$

Наконец, полный к. о. комплекса установок

$$\eta_о = \eta_к = \eta_п = \frac{N_1 t_1 (\eta_{к_1} + \eta_{п_1}) + N_2 t_2 (\eta_{к_2} + \eta_{п_2}) + \quad + N_6 t_6 (\eta_{к_6} + \eta_{п_6})}{N_1 t_1 + N_2 t_2 + \quad + N_6 t_6}$$




Очевидно, к. о. позволяет судить о совершенстве не только отдельных установок, но и о том, насколько совершенна схема транспортного варианта. Это условие имеет большое практическое значение — оно помогает при проектировании выбрать наиболее совершенную схему транспорта.

### 4. Аналитическое определение к. о. транспортных установок

1. *Коэфициент отдачи ленточного транспортера.* Если производительность транспортера $Q$ *т/час,* то при длине трассы $L$ *м* за некоторый промежуток времени $\frac{L}{v}$ будет израсходовано энергии: кинетической $\frac{QL}{3{,}6\,v} \cdot \frac{v^2}{2g}$, потенциальной — $\frac{Q}{3{,}6\,v} L^2 \cos\beta$. Тогда можно написать:

$$\eta_о = \frac{\left(\frac{v^2}{2g} - L\cos\beta\right)\frac{QL}{3{,}6\,v}}{\left[\frac{v^2}{2g} + L(f\sin\beta - \cos\beta + f_x)\right]\frac{QL}{3{,}6\,v}}$$

$$\eta_к = \frac{\frac{v^2}{2g}}{\frac{v^2}{2g} + L(f\sin\beta - \cos\beta + f_x)},$$

$$\eta_п = \frac{-L\cos\beta}{\frac{v^2}{2g} + L(f\sin\beta - \cos\beta + f_x)}$$

По данным, приводимым в литературе, коэфициент сопротивления на транспорте, подсчитанный относительно полезной нагрузки на ленту, равен 0,0002 *л. с./тм/час.* В безразмерном виде этот коэфициент будет иметь следующую величину: $f = \frac{0{,}0002 \cdot 75}{3{,}6} \approx 0{,}0042$.

Коэфициент потерь холостого хода по новым данным для нормальных конструкций при ширине ленты 1000 *мм* принимается равным

$$f_x = 0{,}053 \text{ л. с./м}^2/\text{сек}$$

или

$$f_x = 0{,}053 \quad 75 \quad 3{,}6\frac{v}{Q} = 14{,}3\frac{v}{Q} \text{ единиц.}$$

Тогда получим:

$$\eta_к = \frac{\frac{v^2}{2g}}{\frac{v^2}{2g} + L\left(0{,}0042\sin\beta - \cos\beta + 14{,}3\frac{v}{Q}\right)},$$

$$\eta_о = \frac{\frac{v^2}{2g} - L\cos\beta}{\frac{v^2}{2g} + L\left(0{,}0042\sin\beta - \cos\beta + 14{,}3\frac{v}{Q}\right)}$$

где

$\frac{v}{Q} = \frac{1}{180B^2 f}$ — для плоской ленты, загруженной полностью.

Как показывают расчеты, при больших длинах к. о. транспортера мало отличается от потенциального к. о., что объясняется малыми скоростями движения ленты при значительном статическом сопротивлении. На коротких транспортерных установках (метательные закладочные машины), длиной 1—3 *м*, при высоких скоростях ленты, значительно сказываются динамические явления, и динамический к. о. увеличивается.

2. *Коэфициент отдачи скребкового транспортера.* Коэфициент отдачи скребкового транспортера определяется по тем же уравнениям, по которым находился к. о. ленточного транспортера.

Коэфициент сопротивления холостого хода здесь может быть найден согласно выражению:

$$f_x = \frac{2q_o w' \cos\gamma}{\frac{Q}{3{,}6v}}$$

где $q_o$ — вес 1 *пог. м* одной ветви скребковой ленты, *кг/м*;

$w'$ — коэфициент сопротивления движению скребковой цепи, при скользящих цепях $w' = 0{,}15—0{,}35$, при роликовых цепях $w' = 0{,}05—0{,}20$;

$Q$ — часовая производительность транспортера, *т/час*;

$v$ — скорость цепи, *м/сек*;

$\alpha$ — угол наклона транспортера к горизонтали.

Коэфициент трения груза о железо можно взять согласно следующим данным:

$f = 0{,}47—0{,}51$ для антрацита,

$f = 0{,}57—0{,}66$ для угля,

$f = 0{,}37—0{,}41$ для кокса,

$f = 0{,}72—0{,}73$ для угольной пыли.

Рассчитаем к. о. скребкового транспортера Шахтостроя с роликовой цепью и с подвижными боковыми стенками. Производительность $Q = 200$ *т/час*. Вес одной ветви ленты 75 *кг/м*. Коэфициент сопротивления холостого хода при горизонтальных условиях и скорости $v = 0{,}5$ *м/сек* равен:

$$f_x = \frac{2 \cdot 75 \quad 0{,}1}{200} 3{,}6 \cdot 0{,}5 = 0{,}135.$$

Если принять для угла $f = 0{,}6$, то для горизонтального транспортирования получим:

$$\eta_0 = \eta_к = \frac{\frac{v^2}{2g}}{\frac{v^2}{2g} + (f \sin\beta - \cos\beta + f_x) L} = \frac{\frac{0{,}25}{2 \quad 9{,}81}}{\frac{0{,}25}{2 \quad 9{,}81} + (0{,}6 + 0{,}135)\,5} = 0{,}0035.$$

Очевидно, к. о. скребкового транспортера при горизонтальном транспортировании очень мал, вследствие чего транспортер целесообразнее применять в наклонных условиях.

Зная к. о., можно найти мощность транспортера:

$$N = \frac{Q}{3{,}6 \quad 75\,\eta_к} \quad \frac{v^2}{2g} = \frac{200}{3{,}6 \quad 75 \quad 0{,}0035} \quad \frac{0{,}25}{2 \quad 9{,}81} = 2{,}7 \ л.\,с.$$

3. *Коэфициент отдачи рудничной откатки в вагонетках.* Метод расчета к. о. откатки бесконечным канатом ничем не отличается от метода расчета к. о. ленточного транспортера. Коэфициент сопротивления холостого хода подсчитывается относительно емкости одного вагона; причем в мертвый вес вагона должен включаться вес тягового каната длиной, равной расстоянию между вагонами. Этот коэфициент должен учитывать потери от трения и жесткости каната. Находится коэфициент сопротивления холостого хода согласно следующему выражению:

$$f_x = \frac{2G_м w' \cos\alpha}{G}$$

где

$G$ — емкость вагона;

$G_м$ — мертвый вес вагона;

$w'$ — коэфициент сопротивления движению вагона с учетом сопротивления каната;

$\alpha$ — угол наклона рельсового пути по отношению к горизонту.

Коэфициенты отдачи здесь рассчитываются по формулам, приведенным в примере для ленточного транспортера.

Коэфициенты отдачи локомотивной откатки должны рассчитываться по тем же формулам. Но при локомотивной откатке к потерям относится работа холостого хода как при движении вперед, так и при движении назад. Работа сопротивления от полезного груза принимается только при движении вперед. Тогда коэфициент сопротивления холостого хода выразится так:

$$f_x = \frac{2G_м}{G}\left(w \cos\alpha + \frac{v^2}{2gL}\right)$$

где $w$ — коэфициент сопротивления движению вагонов; остальные обозначения соответствуют предыдущим.

Определяя среднее значение к. о. локомотивной откатки, необходимо при расчете учитывать форму тахограммы согласно выраженной (13).

Аналогично локомотивному транспорту определяется к. о. для откатки концевым канатом, где следует учесть только потери от трения и жесткости каната.

В качестве примера приведем следующий приближенный расчет к. о. локомотивной откатки. Расстояние откатки $L = 1000$ *м*. Емкость одного вагона $G = 1$ *т*. Мертвый вес вагона $G_м = 0{,}62$ *т*. Сопротивление движению $w = 0{,}008$. Груз транспортируется под уклон $i = 0{,}004$. Скорость движения $v = 4$ *м/сек*.

К. о. будет равен:

$$\eta_0 = \frac{\frac{16}{2\ \ 9{,}81} - 0{,}003\ \ 1000}{\frac{16}{2\ \ 9{,}81} + 1000\left[0{,}0085 \cdot 1 - 0{,}003 + \frac{2\ \ 0{,}62}{1}\left(0{,}008 + \frac{16}{2 \cdot 9{,}81 \cdot 1000}\right)\right]} = -0{,}127.$$

Следовательно, в данном случае к. о. отдачи локомотивной откатки близок к 13%, т. е. значительно выше к. о. ленточных транспортеров.

Анализ к. о. показал, что откатка в вагонах оказывается также недостаточно совершенной. Следовательно, ценность нового показателя заключается в том, что он указывает путь для усовершенствования механизмов с низкими значениями к. о.

В результате приведенного расчета получено отрицательное значение к. о. Следовательно, работа двигателя меньше работы силы трения, и частичное транспортирование происходит за счет силы тяжести. Чтобы узнать, произойдет ли рекуперация энергии, необходимо найти знак кинетического к. о. В последнем выражении знаменатель больше нуля, следовательно, кинетический к. о. положителен, т. е. рекуперации энергии в итоге не произойдет.

Допустим далее, что в таких же условиях работают ленточные транспортеры. При той же полезной работе к. о. транспортерного варианта, при скорости ленты $v = 2{,}5$ *м/сек*, будет следующим:

$$\eta_0 = \frac{\frac{2{,}5^2}{2 \cdot 9{,}81} - 3}{\frac{2{,}5^2}{2\ \ 9{,}81} + 1000\,(0{,}0042 - 0{,}003 + 0{,}0795)} = -0{,}033.$$

В приведенном примере электровозная откатка потребляет энергии приблизительно в 4 раза меньше, чем транспортеры.

Таким образом, при локомотивной откатке энергия используется значительно рациональнее, чем при транспортерной перевозке.

## Заключение

Коэфициент отдачи имеет большое практическое значение. До настоящего времени не существовало показателя, характеризующего механическое совершенство транспортных установок, что заставляло, при разработке машин, итти вслепую, без какого-либо представления о рациональности механизмов. Коэфициент отдачи является таким показателем, который позволяет производить оценку совершенства механизмов количественно и с точки зрения динамического режима сил. Такая оценка дает возможность судить о существовании возможностей для усовершенствования тех или иных элементов транспортных механизмов и транспортных схем в целом. Кроме того, к. о. в значительной степени облегчает расчетные и проектные работы.

Коэфициенты отдачи можно рассчитывать аналитическим путем, но часто их целесообразно определять опытно. Поэтому заводам-изготовителям машин в технических характеристиках своей продукции необходимо приводить кривые изменения к. о. в зависимости от производительности и других параметров, оказывающих влияние на к. о.

Проекты рудничного транспорта по шахтам должны заканчиваться выводом общего к. о. транспорта, что служит оценкой совершенства механизмов в принятой схеме транспорта и рациональности расхода энергии.