

НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. И. ШУБОВИЧ

(Представлено проф. докт. техн. наук В. Т. Юринским)

В литературе по вопросам пневматического привода горных механизмов и машин часто дается весьма подробное описание конструкции пневматических двигателей, приводятся параметры и важнейшие показатели для номинальных условий их работы, но мало уделяется внимания зависимостям эффективной мощности, крутящего момента и расхода сжатого воздуха от скорости вращения вала или изменения нагрузки этих двигателей—так называемым скоростным и нагрузочным характеристикам.

В некоторых работах [1—3] приводятся скоростные характеристики пневматических двигателей (не всегда в достаточной мере полные [1]), однако совершенно не упоминаются нагрузочные характеристики, имеющие особую ценность при исследовании экономических и тяговых показателей пневматических двигателей, используемых для привода горных механизмов и машин, работающих с переменными нагрузками. В литературе не рассматриваются также способы анализа и оценки экономичности пневматических двигателей, эксплуатируемых в условиях переменных нагрузок. В связи с этим инженеры-эксплуатационники и конструкторы часто находятся в затруднении при выборе рационального типа пневматического двигателя для конкретной горной машины с заданным графиком нагрузки.

Цель настоящей статьи—частично восполнить этот пробел.

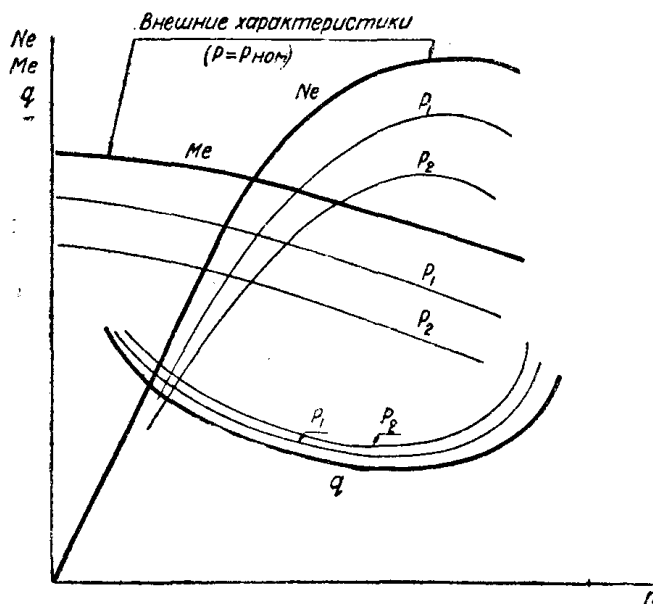
Скоростные характеристики

При стендовых испытаниях пневматических двигателей снимаются обычно скоростные характеристики, которые представляют из себя графики эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e , минутного и удельного расходов воздуха Q и q в зависимости от числа оборотов вала n . Скоростные характеристики, снятые при номинальном (расчетном) давлении сжатого воздуха, подводимого к двигателю, по аналогии с терминологией, принятой при исследовании работы двигателей внутреннего сгорания, можно назвать внешними характеристиками, а характеристики, снятые при любом давлении меньше номинального давления $P_{ном}$ (при „частичном“ давлении)—частичными характеристиками (фиг. 1).

Если пневматический двигатель снабжен регулятором числа оборотов и если этот регулятор не был отключен при снятии характеристик ¹⁾, то

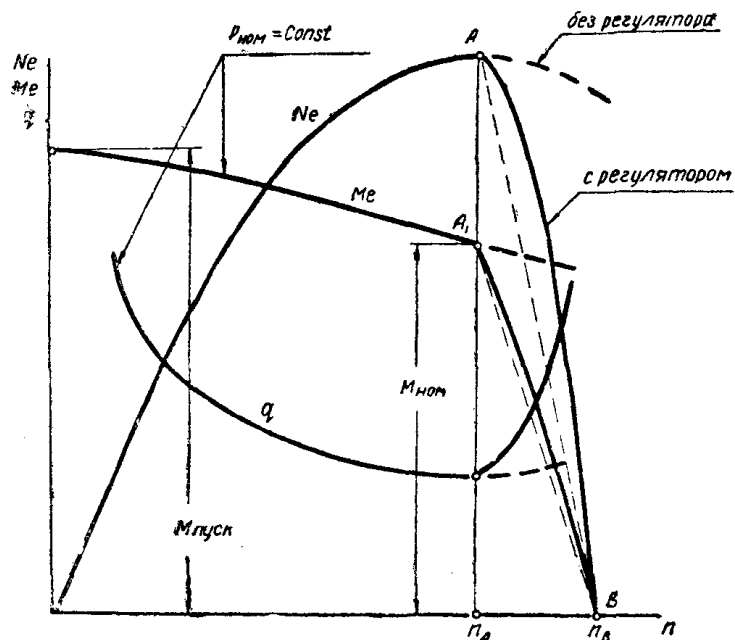
¹⁾ Пневматические двигатели, предназначенные для привода некоторых горных машин, на пример, вентиляторов, водяных насосов и т. п., регуляторами числа оборотов не снабжаются.

внешние характеристики будут иметь вид, например, показанный на фиг. 2. В диапазоне чисел оборотов от $n=0$ до числа оборотов, при котором включается регулятор в работу n_A , изменения эффективной мощности, момента и расхода воздуха по оборотам определяются только свойствами двигателя, так как в этом диапазоне скоростей параметры сжатого воздуха, подводимого к двигателю, остаются неизменными. В интервале чисел



Фиг. 1

оборотов от n_A до n_B изменения показателей двигателя определяются (свойствами и настройкой регулятора числа оборотов, поскольку последний в этом диапазоне скоростей), по мере изменения скоростного режима,



Фиг. 2

воздействует на золотник, установленный в воздухоподводящем канале, и изменяет параметры воздуха, поступающего в рабочую полость двигателя. Поэтому участки скоростных характеристик в пределах $n_A \div n_B$ можно назвать регуляторными характеристиками. Начальные точки регуляторных характеристик A_1 и A (фиг. 2) лежат на внешних характеристиках, а их конечная точка B соответствует холостому ходу двигателя.

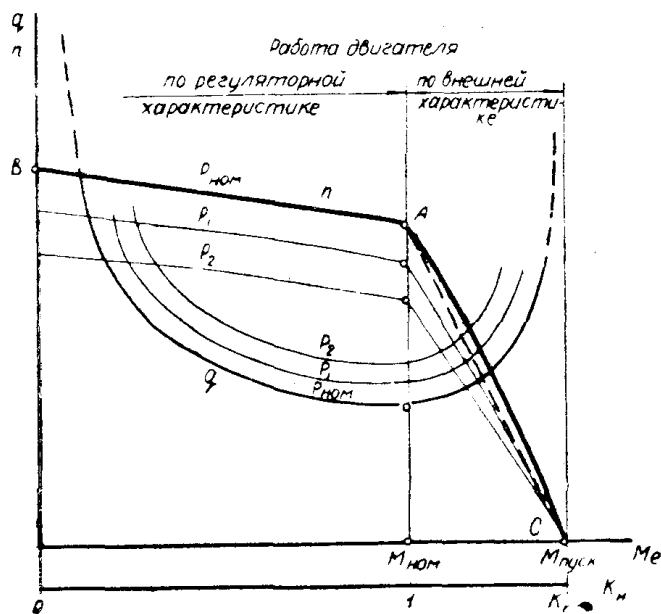
Как известно, механическая нагрузка двигателя определяется величи-

ной внешнего крутящего момента, приложенного к валу двигателя. В случае привода горной машины внешним моментом по отношению к двигателю будет момент сопротивления M_c на приводном валу этой машины. Обычно регулятор числа оборотов пневматического двигателя настраивается так, что он включается в работу при числе оборотов $n_A = n_{ном}$ соответствующем номинальной (расчетной) мощности. Поэтому при величине момента M_c меньшей номинального момента $M_{ном}$ (недогрузка двигателя) работа двигателя будет протекать по регуляторной характеристике. Если окажется, что M_c больше $M_{ном}$, но меньше максимального момента двигателя M_{max} (перегрузка двигателя), то в этом случае двигатель будет работать по внешней характеристике.

Горные машины и механизмы в большинстве случаев работают с нагрузками, изменяющимися в очень широких пределах, и, следовательно, двигатели этих машин в условиях эксплуатации могут работать как на регуляторной, так и на внешней характеристиках.

Нагрузочные характеристики

Для анализа экономических и динамических показателей пневматического двигателя, работающего в условиях переменных нагрузок, когда главным определяющим фактором его режима работы является не скорость (число оборотов), а нагрузка, скоростные характеристики мало удобны и недостаточно наглядны. В таких случаях удобнее пользоваться нагрузочными характеристиками, т. е. такими характеристиками, для которых независимым переменным принимается параметр, оценивающий нагрузку двигателя, например, величина эффективного крутящего момента M_e . Примерный вид нагрузочных характеристик пневматического двигателя показан на фиг. 3. Нагрузочные характеристики могут



Фиг. 3

быть получены опытным путем¹⁾ или могут быть построены по данным скоростных характеристик, например, графическим способом, описанным ниже.

¹⁾ Насколько известно автору, такие опытные характеристики пневматических двигателей в литературе не приводятся.

Очевидно, что каждому постоянному значению давления сжатого воздуха будет соответствовать вполне определенная нагрузочная характеристика. Поэтому на нагрузочных характеристиках должны указываться те постоянные давления в воздушной сети, при которых получены эти характеристики. Нагрузочные характеристики, полученные при нормальном давлении воздуха $p_{ном}$, можно назвать номинальными нагрузочными характеристиками, а характеристики, полученные при давлениях меньше номинального, — частичными нагрузочными характеристиками.

Для сравнительной оценки экономичности пневматических двигателей различных типов нагрузочные характеристики целесообразно строить в зависимости от безразмерного параметра нагрузки. В качестве такого безразмерного параметра можно принять коэффициент загрузки двигателя

$$K_n = \frac{M_c}{M_{ном}}$$

При работе двигателя на регуляторной характеристике $0 < K_n < 1$; на внешней характеристике $1 < K_n < K_{n\max}$.

Максимальная величина крутящего момента пневматического двигателя имеет место при $n = 0$ — в момент пуска двигателя (точнее, при заторможенном двигателе).

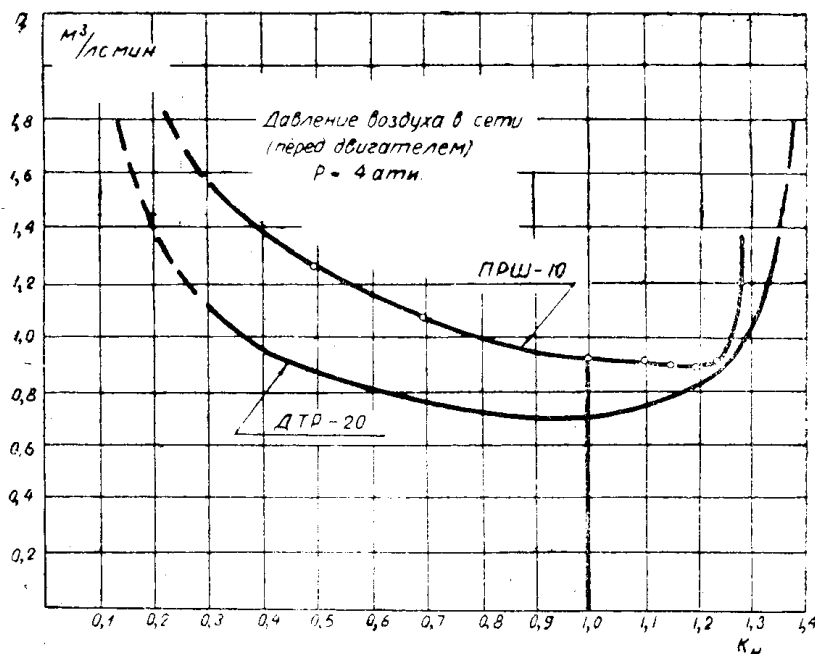
Поэтому

$$K_{n\max} = \frac{M_{\max}}{M_{ном}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{ном}} = K_n.$$

Здесь $M_{\text{пуск}}$ — пусковой момент двигателя;

K_n — коэффициент пускового момента, который обычно приводится в паспортных данных, как показатель тяговых свойств пневматических двигателей.

На фиг. 4, в качестве примера, представлены экономические нагрузочные характеристики $q = \varphi(K_n)$ двух пневматических двигателей: шестеренчатого ПРШ-10 ($N_e = 10$ л.с.) и турбинного ДТР-20 ($N_e = 20$ л.с.). По



Фиг. 4

этим характеристикам легко можно установить не только удельные расходы воздуха для заданной степени нагрузки K_H сравниваемых двигателей, но и те области нагрузок, при которых может быть достигнут наибольший экономический эффект по расходу воздуха от применения того или иного двигателя. Так, например, из графиков (фиг. 4) следует, что сравнительно больший экономический эффект от применения турбинного двигателя вместо шестеренчатого можно получить в том случае, если нагрузка приводимой машины выражается коэффициентом $K_H = 0,4 - 0,5$. Из этих же графиков можно видеть, что при работе двигателей с перегрузкой, турбинный и шестеренчатый двигатели практически равноценны по расходу воздуха только при $K_H \cong 1,25$.

Графический способ построения нагрузочных характеристик

Для большей наглядности и для удобства последующего анализа влияния отдельных факторов на характер протекания кривой удельных расходов, графические построения нагрузочных характеристик проводятся ниже отдельно: для работы двигателя в пределах регулярной (фиг. 5) и внешней (фиг. 6) скоростных характеристик.

По четырем координатным осям диаграмм (фиг. 5, 6) откладываются величины q , M_e , K_H и n в соответствующих масштабах. Масштабы этих величин, кроме K_H , выбираются произвольными, сообразно желательным размерам диаграмм. Масштаб величины K_H находится из условия, что отрезок $M_{ном}$ на оси ординат диаграммы соответствует $K_H = 1$.

Для построения нагрузочных характеристик при работе двигателя на регуляторе в квадранте III диаграммы (фиг. 5) наносятся кривые $M_e = f_1(n)$ внешней, частичных и регуляторной характеристик. Давления сжатого воздуха, при которых были получены внешняя и частичные характеристики $p_{ном}$, p_1 , p_2 , $p_3 \dots$, указываются соответственно над каждой кривой. В квадранте II наносятся кривые удельных расходов $q = f_2(n)$, для тех же давлений сжатого воздуха ($p_{ном}$, p_1 , p_2 , $p_3 \dots$). Координаты точек пересечения внешней и частичных характеристик с регуляторной характеристикой $A, 1, 2, 3 \dots$ определяют числа оборотов и величины развиваемых двигателем моментов при установившихся режимах на рабочих давлениях воздуха $p_{ном}$, p_1 , p_2 , $p_3 \dots$. Переносом ординат этих точек пересечения из квадранта III на горизонтальную ось квадранта I находятся коэффициенты загрузки $K_H, K_{H1}, K_{H2}, K_{H3} \dots$, соответствующие установившимся режимам при давлении воздуха $p_{ном}$, p_1 , p_2 , $p_3 \dots$. В квадранте II на вертикалях, проведенных через точки $A, 1, 2, 3 \dots$, отрезками, ограниченными осью абсцисс и соответствующими кривыми $q = f_2(n)$, определяются величины удельных расходов воздуха $q_{ном}, q_1, q_2, q_3 \dots$ при коэффициентах загрузки $K_H, K_{H1}, K_{H2}, K_{H3} \dots$. Наконец пересечением горизонталей $q_{ном}, q_1, q_2, q_3 \dots$ с вертикалями $K_H, K_{H1}, K_{H2}, K_{H3} \dots$ в квадранте I найдутся точки искомой нагрузочной характеристики $q = \varphi(K_H)$.

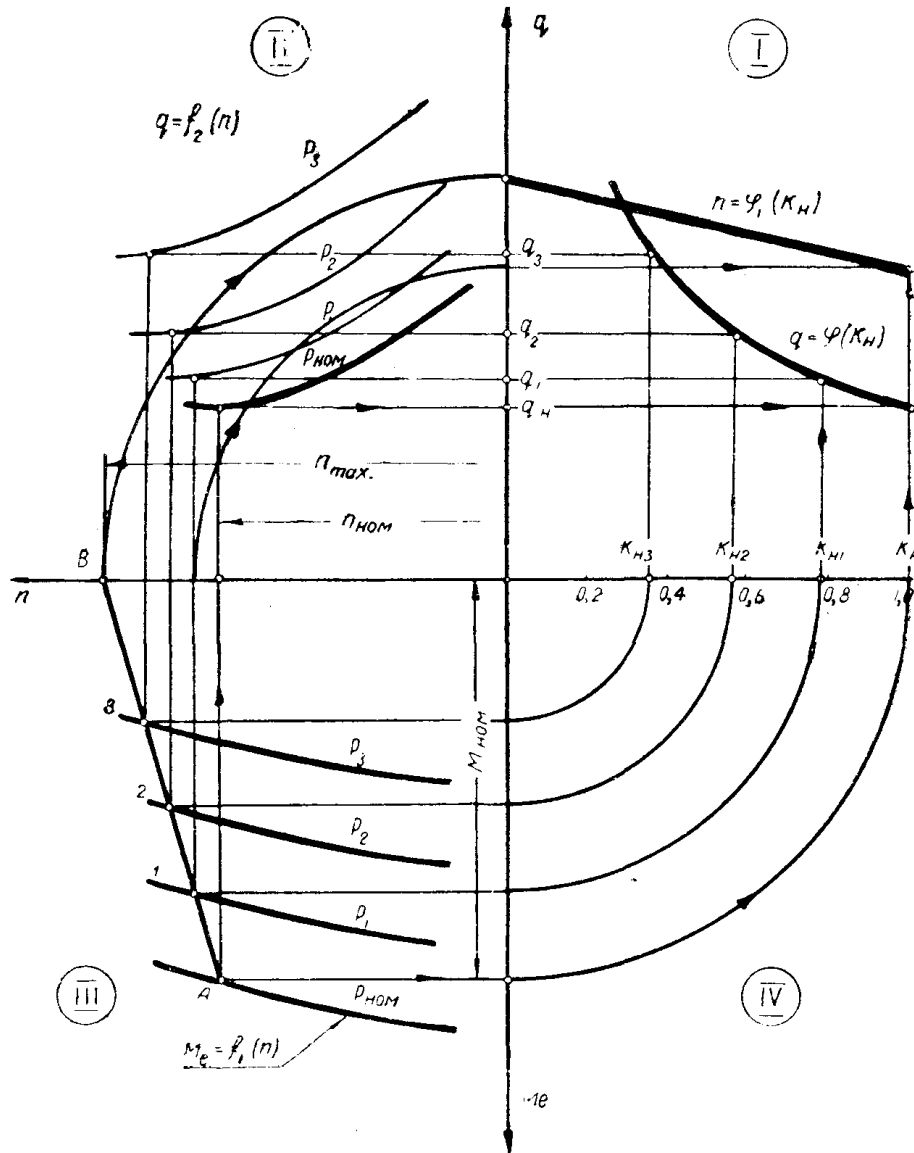
Способ построения зависимости числа оборотов двигателя от коэффициента нагрузки ясен из чертежа (фиг. 5).

Для построения нагрузочных характеристик при работе двигателя на скоростных режимах, охватываемых внешней характеристикой от $n = 0$ до $n = n_A$, в квадранте III диаграммы (фиг. 6) наносится только внешняя характеристика $M_e = f_1(n)$, а в квадранте II соответственно одна кривая $q = f_2(n)$. На внешней характеристике $M_e = f_1(n)$ выбирается произвольное число точек $A, 1, 2, 3 \dots$ и производятся построения в такой же последовательности как описано выше.

Используя кривые $n = \varphi_1(K_H)$, $q = \varphi(K_H)$ и известные соотношения

$$N_e = \frac{M_e \cdot n}{716,2}; \quad Q = qN_e \text{ можно построить также характеристики } N_e = \varphi_2(K_H)$$

и $Q = \varphi_3(K_H)$.



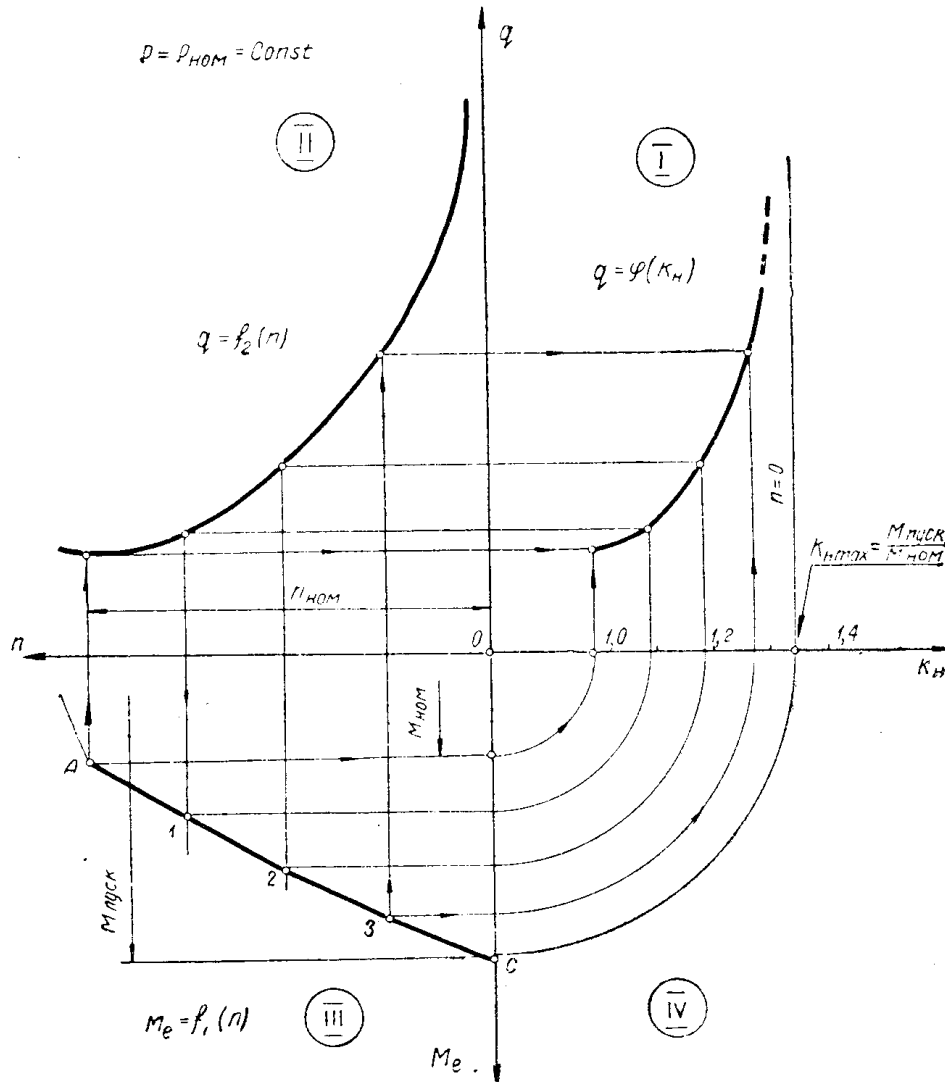
Фиг. 5

Влияние некоторых факторов на вид экономической нагрузочной характеристики

Из диаграммы (фиг. 5) можно видеть, что протекание экономической характеристики по нагрузке $q = \varphi(K_H)$ сильно зависит от закона увеличения удельных расходов по мере снижения рабочих давлений сжатого воздуха, подводимого к двигателю ($q = f(p)$ при $n = \text{const}$).

Чем быстрее увеличиваются удельные расходы при снижении давления сжатого воздуха, тем сильнее снижается экономичность пневматического двигателя при уменьшении нагрузки в пределах регуляторной характеристики.

Из той же диаграммы можно заметить, что форма регуляторной характеристики AB не может существенно повлиять на вид экономической характеристики $q = \varphi(K_H)$. Поэтому при отсутствии опытной регуля-



Фиг. 6

торной характеристики, с достаточной для практических целей точностью, можно заменить ее отрезком прямой AB , как это показано штриховой линией на фиг. 2¹⁾.

На характер протекания кривой удельных расходов $q = \varphi(K_H)$, при работе двигателя с перегрузкой, существенное влияние оказывают два

1) Такая замена, возможна только в том случае, если степень неравномерности регулятора $\delta = 2 \frac{n_B - n_A}{n_B + n_A}$ не выходит за обычные пределы $\delta = 10\%$.

фактора: вид кривой удельных расходов воздуха $q = f_2(n)$ и наклон внешней характеристики эффективного крутящего момента к оси абсцисс (фиг. 5). Пологое протекание кривой $q = f_2(n)$ обеспечивает пологое протекание экономической характеристики $q = \varphi(K_n)$ и, следовательно, экономичность двигателя, обладающего такой характеристикой, будет мало изменяться при отклонениях рабочего режима от номинального в сторону перегрузок.

Увеличение наклона кривой момента $M_e = f_1(n)$ к оси абсцисс приводит к более пологому протеканию экономической характеристики по нагрузке. Но наклон характеристики момента $M_e = f_1(n)$ определяется, как известно, величиной коэффициента пускового момента. Поэтому пневматические двигатели с большим коэффициентом пускового момента обладают более благоприятной по форме экономической характеристикой; перегрузка таких двигателей сопровождается относительно меньшим снижением экономичности.

Оценка экономичности пневматических двигателей, работающих в условиях переменных нагрузок

В паспорте пневматического двигателя обычно приводится величина номинального удельного расхода воздуха. Этот показатель вполне достаточен для суждения об экономичности пневматического двигателя, используемого для привода такой машины, которая при эксплуатации обеспечивает двигателю работу на режимах, близких к номинальным условиям. Номинальный удельный расход воздуха утрачивает значение показателя экономичности для двигателя, работающего с нагрузками, изменяющимися в широких пределах, поскольку эксплуатационные режимы такого двигателя не будут соответствовать тому режиму работы, при котором был получен этот показатель.

В качестве показателя экономичности работы пневматических двигателей, используемых на приводе машин, нагрузка которых изменяется во времени по известному закону, может служить величина среднего удельного расхода, представляющая собой частное от деления количества воздуха, израсходованного за рассматриваемый отрезок времени $t_2 - t_1$, на количество энергии, выработанной двигателем за этот же отрезок времени

$$q_{cp} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q dt}{\int_{t_1}^{t_2} N_e dt} \quad (1)$$

или

$$q_{cp} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \xi(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt}, \quad (2)$$

также

$$q_c = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \xi_1(t) f(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt}, \quad (3)$$

где

$$\xi(t) = Q, \quad (t) = N_e \quad \text{и} \quad \xi_1(t) = q.$$

Таким образом, для определения среднего удельного расхода воздуха пневматического двигателя, работающего в условиях переменных нагрузок, достаточно измерить площади под кривыми $Q = \xi(t)$ и $N_e = f(t)$ в пределах от t_2 до t_1 и поделить первую величину на вторую.

Для случая медленного изменения нагрузки, когда в любой момент времени можно считать режим работы двигателя установившимся, кривые $Q = \xi(t)$, $q = \xi_1(t)$ и $N_e = f(t)$ при наличии кривых $Q = \varphi_1(K_H)$, $N_e = \varphi_2(K_H)$, $q = \varphi(K_H)$ и $K_H = \xi_2(t)$ можно легко получить, пользуясь, например, графическим способом (фиг. 7).

Если сложную кривую изменения нагрузки по времени $K_H = \xi_2(t)$ представляется возможным с достаточной степенью точности заменить ломаной линией (фиг. 8), то средний удельный расход воздуха можно подсчитать по формуле

$$q_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m q_{cpi} N_{cpi} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m N_{cpi} \Delta t_i}, \quad (4)$$

где q_{cpi} и N_{cpi} — соответственно средний удельный расход воздуха и средняя мощность на отрезке времени Δt_i ; m — число выделенных участков на аппроксимированном графике нагрузки.

Для интервалов времени Δt_i , где нагрузка постоянна ($K_H = \text{const}$) величина $q_{cpi} = q_i$, а поэтому может быть найдена непосредственно из нагрузочной характеристики $q = \varphi(K_H)$ по известной величине K_{Hi} .

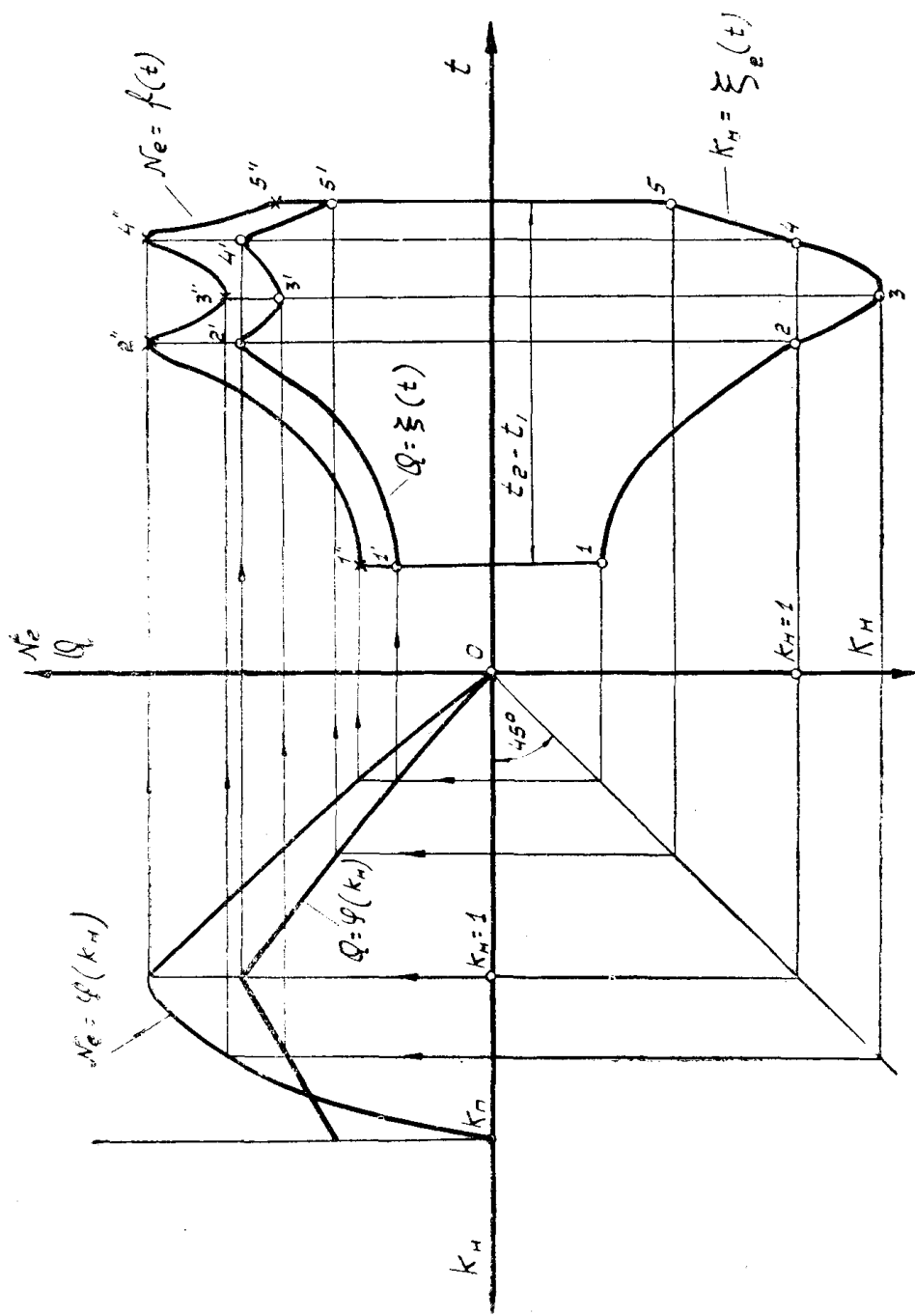
Для интервалов времени Δt_i , где $K_H \neq \text{const}$ величины q_{cpi} следует вычислять по формулам (2—3). В частных случаях, когда на рассматриваемом отрезке времени Δt_i изменение величины q мало, можно воспользоваться упрощенным способом определения среднего расхода воздуха q_{cpi} описанным ниже.

Согласно теореме о среднем, числитель уравнения (3) можно записать так:

$$\int_{t_1}^{t_2} \xi_1(t) f(t) dt = \xi_1(\tau) \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt,$$

где

$$t_1 \leq \tau \leq t_2.$$



Фиг. 7

Поэтому

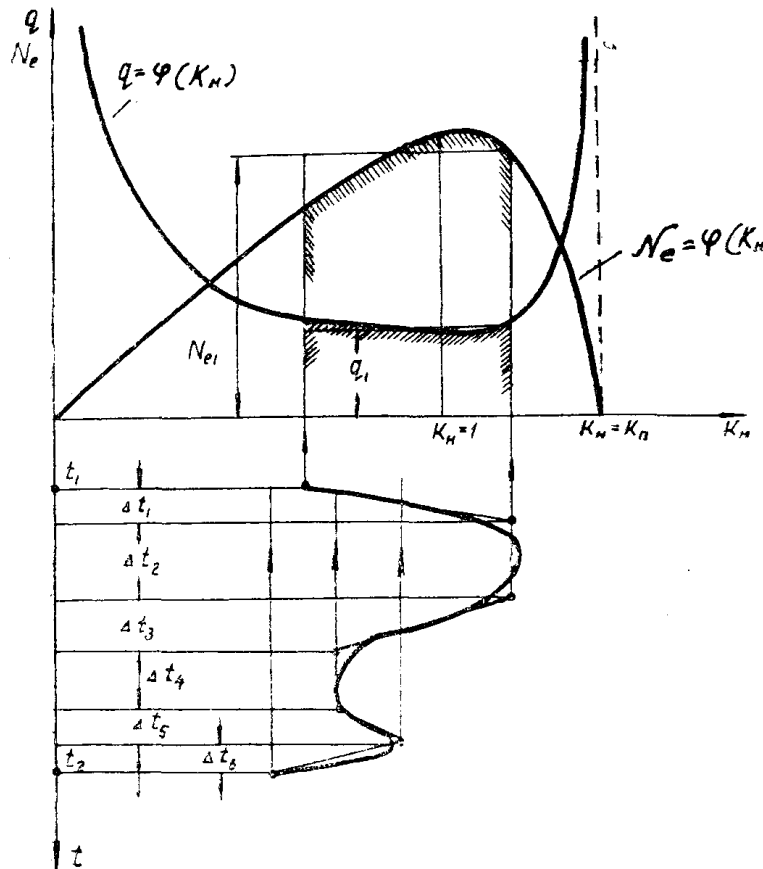
$$q_{срi} = \frac{\int_0^{\Delta t_i} \xi_1(t) f(t) dt}{\int_0^{\Delta t_i} f(t) dt} = \xi_1(\tau) \quad (5)$$

При малых изменениях функций $\xi_1(t)$ и $f(t)$ на отрезке времени Δt_i , величину $\xi_1(\tau)$ можно определить как среднюю ординату кривой

$$q_{срi} = \xi_1(\tau) = \frac{\int_0^{\Delta t_i} \xi_1(t) dt}{\Delta t_i},$$

но при линейном изменении нагрузки по времени

$$\frac{\int_0^{\Delta t_i} \xi_1(t) dt}{\Delta t_i} = \frac{\int_0^{\Delta K_{Hi}} \varphi(K_H) dK_H}{\Delta t_i} = q_{срi} \quad (6)$$



Фиг. 8

Таким образом, величину среднего удельного расхода воздуха $q_{срi}$ для отдельных участков Δt_i аппроксимированного графика нагрузки, где $q = \xi_1(t)$ меняется мало, а $K_H = \xi_2(t)$ изменяется мало и по линейному закону, можно найти как среднюю ординату нагрузочной характеристики $q = \varphi(K_H)$ в пределах изменения нагрузки на величину ΔK_{Hi} .

Из построений (фиг. 8) можно видеть, что величина экономического показателя работы двигателя $q_{ср}$ зависит не только от формы характеристик $q = \varphi(K_H)$ и $N_e = \varphi(K_H)$ данного двигателя, но и от вида графика нагрузки $K_H = \xi_2(t)$. Для одного и того же двигателя величина $q_{ср}$ будет различной, если этот двигатель будет работать при разных графиках нагрузки. Поэтому при пользовании предлагаемым показателем $q_{ср}$ следует иметь в виду, что такой показатель оценивает экономичность работы двигателя только в данных конкретных условиях эксплуатации.

Сравнением величин $q_{ср}$, найденных для различных двигателей при работе на приводе машины с заданным графиком нагрузки, можно установить, какой из двигателей будет наиболее экономичным по расходу воздуха в данных конкретных условиях. Наиболее экономичным будет, очевидно, тот двигатель, для которого $q_{ср}$ окажется наименьшим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кусницин Г. И. Пневматические двигатели горных машин и механизмов. Углетехиздат, 1953.
2. Мишарин А. М. Пневматические шестеренчатые двигатели. Углетехиздат, 1948.
3. Балыков В. М. Угольный комбайн ККП-1 для крутопадающих пластов. Углетехиздат, 1952.