

В. М. ГРЕБЕНИК

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И УГЛА ВЫЛЕТА МАТЕРИАЛА
ИЗ РОТОРНЫХ (ЦЕНТРОБЕЖНЫХ) МАШИН**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 4 X 1951)

Абсолютная скорость движения материала по вращающейся плоскости равна геометрической сумме переносной (окружной) и относительной (движения по плоскости) скоростей. Определение переносной скорости не представляет трудностей. Более сложным является вопрос определения относительной скорости. Рассмотрим вопрос определения относительной скорости при вращении лопатки вокруг горизонтальной оси в общем случае.

Уравнение движения частицы материала по лопатке ротора, вращающегося вокруг горизонтальной оси, с учетом сил трения и веса частиц (рис. 1):

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = mg \cos \varphi + m\omega^2 r_m \cos \gamma_m -$$

$$- \left(mg \sin \varphi + m\omega^2 r_m \sin \gamma_m + 2m\omega \frac{ds}{dt} \right) \operatorname{tg} \rho, \quad (1)$$

где m — масса частицы; s — путь, проходимый частицей по лопатке; S_0 — начальное положение частицы на лопатке; ω — угловая скорость; r_m — текущее значение радиуса, определяющего положение центра тяжести частицы; γ_m — угол между лопаткой и радиусом r_m ; t — время движения частицы по лопатке; $\operatorname{tg} \rho$ — коэффициент трения частицы о лопатку (принимается постоянным); g — ускорение силы тяжести; $\varphi = \varphi_0 + \varphi'$ — текущее значение угла поворота лопатки; φ_0 — угол, составляемый радиусом с горизонталью в начале движения частицы по лопатке; $r_h = R_b \sin \gamma = r_m \sin \gamma_m$; R_b — наружный радиус ротора; S_l — длина лопатки.

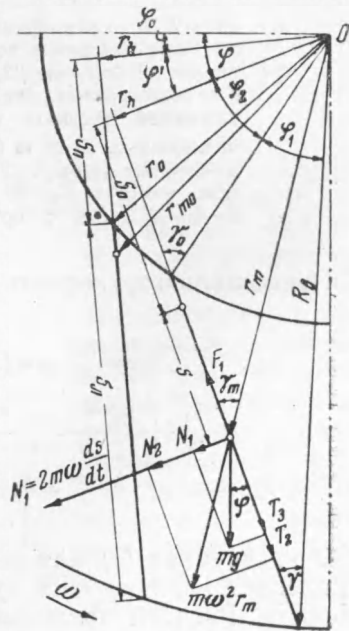


Рис. 1. Схема к определению относительной скорости движения частицы материала по лопатке ротора. Общий случай

Уравнение (1) приводится к виду:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\omega \operatorname{tg} \rho \frac{ds}{dt} - \omega^2 s = \omega^2 (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) + g (\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \rho). \quad (1')$$

Решая это уравнение относительно s , получим:

$$s = (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) \left(\frac{ae^{b\omega t} + be^{-a\omega t}}{a + b} - 1 \right) + \frac{g}{2\omega^2} \left\{ \frac{e^{b\omega t} - e^{-a\omega t}}{a + b} [\cos(\varphi_0 + \rho) + b \sin(\varphi_0 + \rho)] - e^{b\omega t} \sin(\varphi_0 + \rho) + \sin(\varphi_0 + \rho + \omega t) \right\}. \quad (2)$$

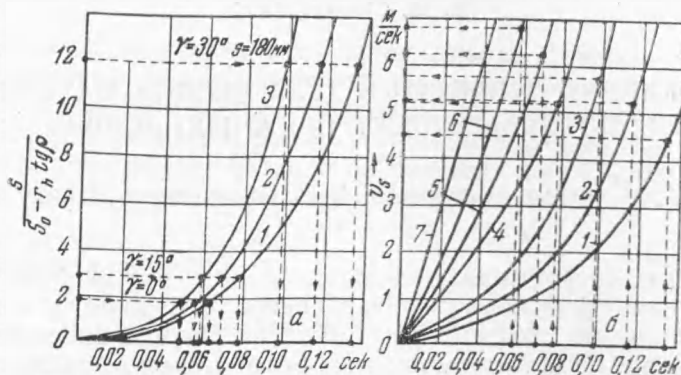


Рис. 2. a — номограммы для определения времени движения частицы материала по лопатке ротора t для заданных угловых скоростей ω : 1— $\omega=32,4 \text{ сек}^{-1}$, 2— $\omega=37,7 \text{ сек}^{-1}$, 3— $\omega=43,2 \text{ сек}^{-1}$. b — номограммы для определения относительной скорости движения частицы материала по лопатке ротора v_s для заданных γ , S_0 и ω (по времени t): при $\gamma=30^\circ$ и $S_0=63 \text{ мм}$: 1— $\omega=32,4 \text{ сек}^{-1}$, 2— $\omega=37,7 \text{ сек}^{-1}$, 3— $\omega=43,2 \text{ сек}^{-1}$; при $\gamma=15^\circ$ и $S_0=90 \text{ мм}$: 4— $\omega=32,4 \text{ сек}^{-1}$, 5— $\omega=37,7 \text{ сек}^{-1}$, 6— $\omega=43,2 \text{ сек}^{-1}$; при $\gamma=0^\circ$ и $S_0=98 \text{ мм}$: 7— $\omega=43,2 \text{ сек}^{-1}$.

Относительная скорость движения по лопатке

$$v_s = \frac{ds}{dt} = \omega (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) \left(\frac{e^{b\omega t} - e^{-a\omega t}}{a + b} \right) + \frac{g}{2\omega} \left\{ \frac{be^{b\omega t} + ae^{-a\omega t}}{a + b} [\cos(\varphi_0 + \rho) + b \sin(\varphi_0 + \rho)] - be^{b\omega t} \sin(\varphi_0 + \rho) - \cos(\varphi_0 + \rho + \omega t) \right\}. \quad (3)$$

В уравнениях (2) для s и (3) для v_s второе слагаемое правой части определяет влияние веса куска материала на величину относительной скорости. Расчеты показывают, что вес материала незначительно сказывается на величине относительной скорости (до 5%). Поэтому расчеты можно вести без учета веса материала по уравнениям:

$$s = (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) \left(\frac{ae^{b\omega t} + be^{-a\omega t}}{a + b} - 1 \right), \quad (4)$$

$$v_s = \omega (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) \left(\frac{e^{b\omega t} - e^{-a\omega t}}{a + b} \right). \quad (5)$$

Эти уравнения легко приводятся к виду, удобному для расчетов:

$$s = (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) \left[\left(\operatorname{ch}' k \omega t + \frac{\mu}{k} \operatorname{sh} k \omega t \right) e^{-\mu \omega t} - 1 \right], \quad (6)$$

$$v_s = \frac{\omega}{k} (S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho) e^{-\mu \omega t} \operatorname{sh} k \omega t, \quad (7)$$

где

$$a = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \rho + 1} + \operatorname{tg} \rho = k + \mu;$$

$$b = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \rho + 1} - \operatorname{tg} \rho = k - \mu.$$

Система уравнений (6) и (7) решается графически. Для решения этих уравнений составляются таблицы в соответствии с заданными параметрами машины: R_b , γ , s , ω , $\operatorname{tg} \rho$. Затем строятся номограммы. По первому уравнению строятся номограммы для определения времени t .

На рис. 2а приведены номограммы для определения времени движения частицы материала по лопатке для заданных ω . По оси ординат отложены значения $\frac{s}{S_0 - r_h \operatorname{tg} \rho}$, а не значения s , так как в этом случае нет надобности строить кривые при различных

углах наклона лопатки γ для каждого значения угловой скорости. При расчетах принято: $R_b = 278$ мм; $\operatorname{tg} \rho = 0,35$; $\gamma = 0, 15, 30^\circ$;

$\omega = 32,4, 37,7, 43,2$ сек⁻¹ (соответственно окружным скоростям 9,0, 10,5, 12,0 м/сек.); длина лопатки $S_n = 180$ мм.

На рис. 2б приведены номограммы для определения величины относительной скорости движения частицы по лопатке ротора v_s для заданных γ , S_0 и ω . Для данных параметров машины R_b , γ , s , ω , $\operatorname{tg} \rho$ (S_0 , r_h) определяется время t по рис. 2а (показан пример при $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 15^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$). По времени t , пользуясь номограм-

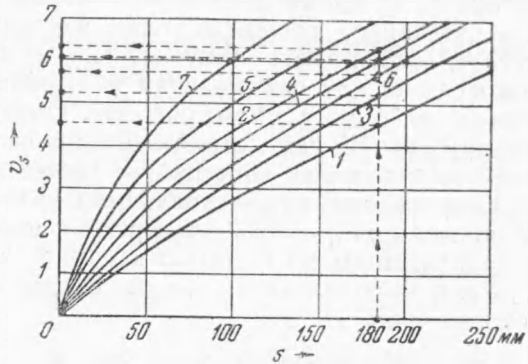


Рис. 3. Номограммы для определений относительной скорости движения частицы материала по лопатке ротора v_s для заданных ω , γ и S_0 (по пути s). При $\omega = 32,4$ сек⁻¹: 1— $\gamma = 30^\circ$, $S_0 = 63$ мм; 2— $\gamma = 0^\circ$, $S_0 = 98$ мм. При $\omega = 37,7$ сек⁻¹: 3— $\gamma = 30^\circ$, $S_0 = 63$ мм; 4— $\gamma = 15^\circ$, $S_0 = 90$ мм; 5— $\gamma = 0^\circ$, $S_0 = 93$ мм. При $\omega = 43,2$ сек⁻¹: 6— $\gamma = 30^\circ$, $S_0 = 63$ мм; 7— $\gamma = 0^\circ$, $S_0 = 98$ мм

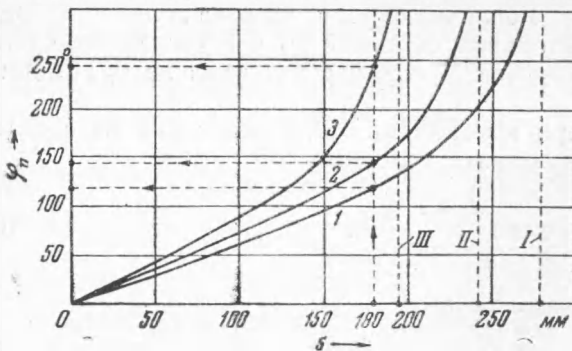


Рис. 4. Номограммы для определения углов поворота ротора φ_n^0 за время движения частицы материала по лопатке для заданных γ (по пути s). I— $\gamma = 0^\circ$, 2— $\gamma = 15^\circ$, 3— $\gamma = 30^\circ$. I— $S_0 = r_h \operatorname{tg} \rho$, $\gamma = 0^\circ$; II— $S_0 = r_h \operatorname{tg} \rho$, $\gamma = 15^\circ$; III— $S_0 = r_h \operatorname{tg} \rho$, $\gamma = 30^\circ$

мами рис. 2б, определяется значение v_s .

Пользуясь таблицами, составленными по уравнениям (6) и (7) для заданных параметров машины, можно построить графики $v_s = f(s)$

непосредственно. На рис. 3 приведены кривые, построенные по тем же таблицам, что и графики на рис. 2.

Траектория движения частицы материала легко определяется по значениям пути s и угла поворота φ , взятым через одинаковые промежутки времени.

Траектории движения частиц материала по лопатке строятся для разных углов наклона лопатки и начальных положений частиц S_0 , что дает возможность определить место схода частицы с лопатки ротора. Угол вылета материала из машины определится направлением абсолютной скорости и местом схода материала с лопатки ротора.

На рис. 4 приведены номограммы для определения углов поворота ротора φ_n за время движения частицы материала по лопатке ротора (для заданных значений углов наклона лопатки γ) в зависимости от пути s , проходимого частицей по лопатке. Можно построить также номограммы для определения φ_n в функции времени t (время определяется по номограммам рис. 2а). Однако эти номограммы неудобны тем, что необходимо строить столько кривых, сколько принято значений углов наклона лопаток γ и угловых скоростей ω .

Номограммы для определения углов поворота ротора φ_n строятся по уравнению $\varphi_n = 57,3 \omega t$. Время t определяется для заданных параметров машины по номограммам рис. 2а.

Угол, определяющий место схода материала с наружной кромки лопатки (рис. 1):

$$\varphi_{сх} = \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_n \quad (8)$$

Кривые $\varphi_n = f(\gamma, s)$ асимптотически приближаются к значениям s , при которых $S_0 = r_h \operatorname{tg} \rho$ для данных параметров машины (рис. 4), так как, согласно уравнениям (6) и (7), путь, проходимый частицей s , и скорость ее движения по лопатке v_s будут равны нулю, а угол поворота ротора за время движения по лопатке материала будет равен бесконечности.

Начальное положение частицы определится по уравнению:

$$S_0 = R_b \cos \gamma - s \quad (9)$$

Влияние угла наклона лопатки γ учитывается в уравнениях (6) и (7) величиной $r_h = R_b \sin \gamma$. Увеличение угла наклона лопатки вперед ведет к уменьшению относительной скорости v_s и к увеличению угла поворота ротора φ_n . При значении $S_0 \leq r_h \operatorname{tg} \rho$ материал не будет двигаться по лопатке.

Угол наклона лопатки, при котором не будет зависания материала, должен удовлетворять следующему условию:

$$\gamma \leq \arccos \frac{S_0 + r_h \operatorname{tg} \rho}{R_b} \quad (10)$$

Лопатку необходимо делать длины:

$$S_n \leq R_b \cos \gamma - r_h \operatorname{tg} \rho \quad (11)$$

Проведенные нами совместно с проф. Н. С. Щиренко испытания роторной машины, а также выполненные расчеты подтвердили правильность полученных формул и сделанных выводов.

Работа выполнена под руководством проф. Н. С. Щиренко, которому выношу глубокую благодарность за ценные указания.

Сибирский металлургический институт
Сталинск

Поступило
13 VII 1951