

УДК 622.243.94

О.Ф.ПУТИКОВ, В.С.ЛИТВИНЕНКО
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕНЕТРАТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ

Для оценки эффективности формы рабочей поверхности нагревательного устройства (пенетратора) термического бурения ранее было предложено^х использовать их коэффициент полезного действия, определяемый соотношением

$$\xi = N_0 / N_H, \quad (1)$$

где N_0 - тепловая мощность, минимально необходимая для проплавления твердой среды в миделевом сечении пенетратора; N_H - мощность, снимаемая с рабочей поверхности пенетратора;

$$N_0 = \pi [R_H^2(s_2) - R_H^2(s_1)] (k_c + k_\phi) Pe; \quad (2)$$

s_1 и s_2 - длина дуги начала и конца образующей рабочей поверхности пенетратора, являющейся поверхностью вращения вокруг его оси; $R_H = r_H / l$; r_H - радиальная координата поверхности пенетратора в цилиндрической системе координат (z, r, φ) с осью z , совпадающей с осью пенетратора; l - характерный размер пенетратора; $k_c = c_T / c_\kappa$; c_T и c_κ - удельная теплоемкость твердой фазы среды и расплава соответственно; $k_\phi = L / [c_\kappa (t_\phi - t_\infty)]$; L - удельная теплота плавления твердой фазы; t_ϕ - температура плавления твердой фазы; t_∞ - невозмущенная температура твердой фазы в бесконечно удаленных точках; $Pe = vl / a_T$ - критерий Пекле; v - скорость бурения; a_T - коэффициент температуропроводности твердой фазы среды;

$$N_H = 2\pi \int_{s_1}^{s_2} R_H Q_H(s) ds; \quad (3)$$

s - криволинейная координата вдоль образующей поверхности пенетратора.

^х В.К.Чистяков, А.Н.Саламатин, С.А.Фомин, В.А.Чугунов. Тепломассоперенос при контактно-м плавлении. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984.

В.К.Чистяков, В.А.Чугунов. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при бурении скважин / Ленинградский горный ин-т. Л., 1988.

Для изотермической поверхности пенетратора бесконечного бурения при естественном обтекании его поверхности расплавом (без перепада давления) имеем плотность теплового потока на ней

$$q_H = \bar{q}_H \frac{dR_H}{ds}, \quad (4)$$

где

$$\bar{q}_H = \text{Pe}_ж \bar{B} (1 + 0,35 \text{Pe}_ж K_h \bar{H}) / (1 - 0,15 \text{Pe}_ж K_h \bar{H}); \quad (5)$$

$$\bar{H}^3 = \frac{3(1+\bar{\mu})}{[R_H^2(s_2) - R_H^2(s_1)]} \int_{s_1}^{s_2} R_H^3 \left(\frac{dR_H}{ds} \right)^3 ds; \quad (6)$$

$$\bar{H} = H \frac{dR_H}{ds};$$

$H = h / (lK_h)$ - безразмерная толщина слоя расплава; h - толщина слоя расплава;

$$\bar{B} = K_\phi + BK_\lambda / \text{Pe}_ж; \quad B = a / \frac{dR_H}{ds}; \quad \text{Pe}_ж = \text{Pe} K_\lambda / K_c;$$

$\bar{q}$ - плотность теплового потока на поверхности плавления; $K_\lambda = \lambda_T / \lambda_H$; λ_T и λ_H - коэффициенты теплопроводности твердой фазы и материала пенетратора; $K_h = (\rho_T \mu_\phi \nu / \rho_ж W)^{1/3}$; ρ_T и $\rho_ж$ - плотности твердой фазы и жидкой (расплава) соответственно; W - удельная нагрузка на забой со стороны термобурового снаряда, рассчитанная на единицу площади миделева сечения пенетратора; $\bar{\mu} = \mu_H / \mu_\phi$; μ_H и μ_ϕ - динамический коэффициент вязкости расплава при температуре пенетратора и температуре фазового перехода соответственно.

Предположим, что два сравниваемых пенетратора имеют одинаковые максимальные радиусы $R_H(s_2)$ и минимальные $R_H(s_1)$. Тогда, как видно из формулы (2), значение мощности N_0 для них одинаково. В этом случае отношение значений их КПД в соответствии с формулой (1) определится соотношением

$$\xi_1 / \xi_2 = N_{H,2} / N_{H,1}, \quad (7)$$

где ξ_1 и $N_{H,1}$ - КПД и мощность соответственно 1-го пенетратора; ξ_2 и $N_{H,2}$ - КПД и мощность соответственно 2-го пенетратора.

С учетом соотношений (3)-(5), получаем

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{\bar{q}_{H,2} \int_{s_1}^{s_2} R_{H,2} \frac{dR_{H,2}}{ds} ds}{\bar{q}_{H,1} \int_{s_1}^{s_2} R_{H,1} \frac{dR_{H,1}}{ds} ds} = \frac{\bar{q}_{H,2} [R_{H,2}^2(s_1) - R_{H,2}^2(s_2)]}{\bar{q}_{H,1} [R_{H,1}^2(s_1) - R_{H,1}^2(s_2)]}, \quad (8)$$

где $\bar{q}_{H,1}$ и $R_{H,1}$ - соответствующие параметры 1-го пенетратора; $\bar{q}_{H,2}$ и $R_{H,2}$ - 2-го пенетратора.

С учетом условия равенства максимальных и минимальных радиусов двух сравниваемых пенетраторов $R_{H,1}(s_1) = R_{H,2}(s_1)$ и $R_{H,1}(s_2) = R_{H,2}(s_2)$, находим из выражения (8)

$$\xi_1/\xi_2 = \bar{Q}_{H,2}/\bar{Q}_{H,1} \quad (9)$$

Отсюда, с учетом соотношения (5), получим

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{(1+0,35 \operatorname{Re}_{\text{ж}} K_h \bar{H}_2)(1-0,15 \operatorname{Re}_{\text{ж}} K_h \bar{H}_1)}{(1-0,15 \operatorname{Re}_{\text{ж}} K_h \bar{H}_2)(1+0,35 \operatorname{Re}_{\text{ж}} K_h \bar{H}_1)}, \quad (10)$$

где $\bar{H}_1$ и $\bar{H}_2$ - значение параметра $\bar{H}$ для I-го и 2-го пенетраторов соответственно.

Полагая $R_H(s_1) = 0$ и $R_H(s_2) = 1$ и переходя к цилиндрическим координатам, из уравнения (6) находим

$$\frac{\bar{H}^3}{3(1+\bar{\mu})} = \int_{R_H(s_1)}^{R_H(s_2)} R_H^3 \left[1 + \left(\frac{dz}{dR_H} \right)^2 \right]^{-1/2} dR_H = \int_0^1 R_H^3 \left[1 + \left(\frac{dz}{dR_H} \right)^2 \right]^{-1/2} dR_H. \quad (11)$$

Сравним два пенетратора одинакового максимального безразмерного радиуса R_H , равного единице на высоте от начала координат $z/l = 2,453$ (от конца пенетратора 2,053); и одинакового объема. У I-го пенетратора образующая является цепной линией, определяемой уравнением

$$z_1 = 0,2 \left(e^{2,5R_H} + e^{-2,5R_H} \right), \quad (12)$$

у второго - парабола

$$\left. \begin{aligned} z_2 &= 0,4 + 2,05R_H^2, \quad 0,4 \leq z_2 \leq 2,453 \\ R_H &= 1, \quad 2,453 \leq z_2 \leq 2,600 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Интегралы (11), рассчитанные с учетом уравнений (12) и (13), имеют значения для образующей - цепной линии

$$\frac{\bar{H}_1^3}{3(1+\bar{\mu})} = \int_0^1 R_H^3 \left[1 + \left(\frac{dz_1}{dR_H} \right)^2 \right]^{-1/2} dR_H = \int_0^1 R_H^3 \left[1 + 0,25 \left(e^{2,5R_H} - e^{-2,5R_H} \right)^2 \right]^{-1/2} dR_H = 0,02449;$$

для образующей - парабола

$$\frac{\bar{H}_2^3}{3(1+\bar{\mu})} = \int_0^1 R_H^3 \left[1 + \left(\frac{dz_2}{dR_H} \right)^2 \right]^{-1/2} dR_H = \int_0^1 R_H^3 \frac{dR_H}{(1+16,86R_H^2)} = 0,02459.$$

Отсюда при заданных значениях $\bar{\mu} = 0,1$ имеем $\bar{H}_1 = 0,4324$; $\bar{H}_2 = 0,4330$; при $\bar{\mu} = 1$ $\bar{H}_1 = 0,5278$; $\bar{H}_2 = 0,5285$.

При тепловом бурении льда обычно $K_h \approx 10^{-3}$, $Re_{ж} \approx 10 \div 100$. С учетом этих значений параметров при $K_h = 10^{-3}$ и $\bar{\mu} = 0,1$ при $Re_{ж} = 10$ получаем из уравнения (10): $\xi_1 / \xi_2 = 1,00022$; при $Re_{ж} = 100$ получаем $\xi_1 / \xi_2 = 1,00003$. Аналогично при $\bar{\mu} = 1$ и $Re_{ж} = 10$ получаем $\xi_1 / \xi_2 = 1,000003$ и при $Re_{ж} = 100$ получаем $\xi_1 / \xi_2 = 1,000035$.

Отсюда можно сделать заключение, что при рассмотренных значениях параметров КПД пенетратора с поверхностью вращения, образующая которой является ценной линией, имеет практически то же значение, что и КПД пенетратора в форме параболоида вращения, оптимальность которого доказана численными расчетами.