

Рис. 37. Схема индукционного прогрева:  
 а – шаг между витками; h – высота индуктора; 1 – индуктор; 2 – стержневая арматура; 3 – металлическая опалубка

Далее приведены примеры расчета индукционного прогрева бетона монолитного ригеля и колонны.

### 5.5.2. Примеры расчета индукционного прогрева бетона

#### Индукционный прогрев бетона монолитного ригеля

Рассчитать параметры индукционного прогрева монолитного ригеля сечением 30×40 см, длиной 3,2 м, армированного 8 стержнями Ø 22 мм, возводимого в деревянной опалубке тол-

### 5. Технология бетонирования с применением прогривных методов

щиной 40 мм при начальной температуре бетона +10 °С, температуре наружного воздуха –20 °С, скорости ветра 5 м/с. Бетон класса В22,5 приготовлен на портландцементе М500 (расход 360 кг/м<sup>3</sup>). Требуемая относительная прочность к концу прогрева – 50 % от R<sub>28</sub>. Кроме того, дано:

$$C_b = 0,25 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}), \text{ т. е. } 1,05 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C});$$

$$C_{оп} = 0,65 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}), \text{ т. е. } 2,73 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C});$$

$$\gamma_b = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3; \gamma_{оп} = 700 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

На основе заданных параметров устанавливаем, что средняя температура бетона в период разогрева составит:

$$t_{cp}^p = \frac{t_{б.н} + t_{max}}{2} = \frac{10 + 70}{2} = 40 \text{ }^\circ\text{C},$$

в период изотермического прогрева  $t_{cp}^{из} = t_{max} = +70 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в период

остывания по формуле для  $M_n = 8-12 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{cp}^{ост} = \frac{t_{б.н}^k}{3}$ ,

$$t_{cp}^{ост} = \frac{t_{max}}{3} = \frac{70}{3} = 23,3 \text{ }^\circ\text{C},$$

тогда средневзвешенная температура всего процесса термообработки будет равна:

$$t_{cp.взв} = \frac{t_{cp}^p \cdot \tau_p + t_{cp}^{из} \cdot \tau_{из} + t_{cp}^{ост} \cdot \tau_{ост}}{\tau_p + \tau_{из} + \tau_{ост}} = \frac{40 \cdot 4 + 70 \cdot 4 + 23,3 \cdot 30}{4 + 4 + 30} = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По табл. 66 находим, что для портландцемента М500 при  $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальное тепловыделение цемента  $Q_{max}$  составит 92,5 ккал/кг, а коэффициент темпа выделения (В) – 0,07, значит

$$P_p = \left\{ \frac{C_b \gamma_b \delta_{оп}}{864} + \frac{C_{оп} \cdot \gamma_{оп} \cdot \delta_{оп} \cdot M_n}{864 \cdot \tau_p} \left( \frac{t_{max} - t_{н.в}}{2} \right) + \frac{\alpha \cdot K \cdot M_n}{864} \times \left[ \left( \frac{t_{max} + t_b}{2} - t_{н.в} \right) - \frac{Q_{max} \cdot \Pi}{864(t_{max} - t_{б.н})} \left[ 1 - (B \cdot \tau_p + 1) \exp^{-B \cdot \tau_p} \right] \right] \right\} V \text{ кВт.}$$

( $Q_{max}$  и В берем из прил. 15, а  $\alpha$  и К – из прил. 16 и 17).

10 11 12







Схема трансформатора с сердечником имеет место в том случае, когда в полости железобетонного изделия или сооружения расположен магнитопровод (или группа магнитопроводов) с индукционной обмоткой. Здесь тепло в основном выделяется в электрически замкнутых металлических элементах (замкнутая металлическая форма, опалубка, арматурные хомуты, кольцевая арматура и т. д.), плоскость которых перпендикулярна оси магнитопровода.

### 5.5.1. Методика расчета параметров режима индукционного нагрева бетона

Интенсивность тепловыделения источников тепла при индукционном нагреве не зависит от свойств бетона, а определяется электрическими и магнитными свойствами источника (арматурой, опалубкой, формой, стенкой камеры) и напряженностью магнитного поля.

Электромагнитные поля с большими периметрами могут быть получены с помощью многовитковых катушек-индукторов из хорошо проводящего материала. Вихревые токи, возникающие в опалубке и арматуре, циркулируют не по всей ее толщине. По мере проникновения вглубь электромагнитная волна затухает, поэтому плотность тока и напряженность полей имеют наибольшие значения у поверхности металла.

Электромагнитная волна с частотой  $f$ , падающая на поверхность металла, имеющего удельное электросопротивление  $\rho_s$  и магнитную проницаемость  $\mu_1$ , затухает в поверхностном слое толщиной  $\Delta S$ , см ( $\Delta S$  – глубина проникновения тока в металл):

$$\Delta S = 5030 \sqrt{\frac{\rho_s}{\mu_1 \cdot f}}$$

С единицы поверхности металла, удельное сопротивление которой  $\rho$ , а относительная магнитная проницаемость  $\mu$ , нахо-

дящейся в переменном магнитном поле с частотой  $f$ , напряженностью  $H$ , выделяется активная мощность ( $\Delta P_a$ ), Вт/см<sup>2</sup>,

$$\Delta P_a = \rho_n \cdot H^2,$$

где  $\rho_n$  имеет физический смысл удельного поверхностного электрического сопротивления материала загрузки:

$$\rho_n = \frac{\rho}{\Delta S} = 2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \text{ Ом.}$$

Зная  $\rho$ ,  $\mu$  и  $f$ , можно определить напряженность поля  $H$ , которую необходимо создать, чтобы выделить в металле требуемую мощность  $\Delta P_a$ . Однако  $\mu$  является функцией напряженности поля. Для вычисления  $\Delta P_a$  необходимо заранее знать зависимость  $\mu$  от  $H$ .

Зависимость между удельным электросопротивлением материала (Ом·см), выделяемой активной мощностью (Вт/см<sup>2</sup>) и магнитным полем напряженности (Ом/см<sup>2</sup>) представлена на рис. 35.

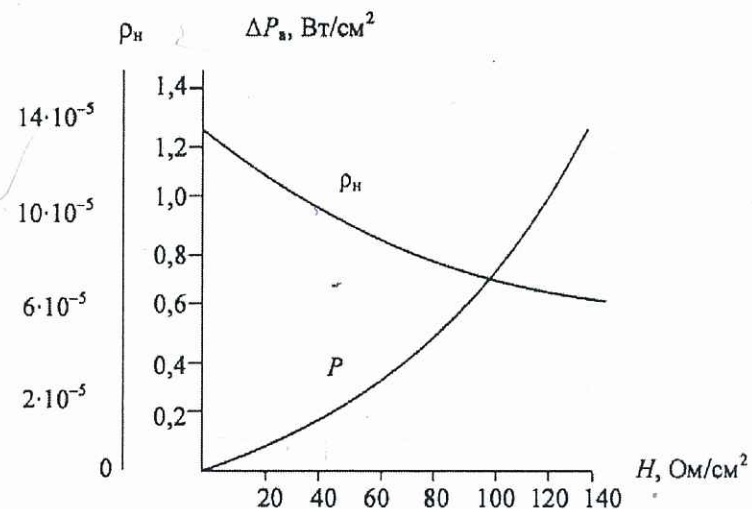


Рис. 35. Зависимость удельной мощности  $P$  и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_n$  металла от напряженности магнитного поля

Активное сопротивление цилиндрического индуктора, Ом, определяется по формуле:

$$r_i = A \cdot R_i,$$

а индуктора прямоугольного сечения:

$$r_i = \frac{A}{\pi} (a_i + b_i),$$

где  $A = 1,26 \cdot 10^{-5}$  Ом/см – для медного провода индуктора;  $A = 1,66 \cdot 10^{-5}$  Ом/см – для алюминиевого провода индуктора;  $R_i$  – радиус цилиндрического индуктора, равный  $R_i = (R_k + \delta_{оп})$ ;  $R_k$  – радиус конструкции, см;  $a_i, b_i$  – длины сторон сечения прямоугольного индуктора, см:

$$a_i = (a_k + \delta_{оп});$$

$$b_i = (b_k + \delta_{оп}),$$

где  $a_k$  и  $b_k$  – длины сторон сечения конструкции, см.

Индуктивное сопротивление цилиндрического индуктора, Ом, равно:

$$\omega \cdot L_i = B \cdot R_i \cdot \beta,$$

а индуктора прямоугольного сечения:

$$\omega \cdot L_i = \frac{B}{\pi} a_i \cdot b_i \cdot \beta;$$

$$b_i = 1,24 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/см}^2,$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент формы индуктора, который определяется по рис. 36 в зависимости от отношения длины (высоты) индуктора к его радиусу:

$$\frac{h}{R}, \text{ т. е. } \frac{h \cdot \pi}{a_i \cdot b_i}.$$

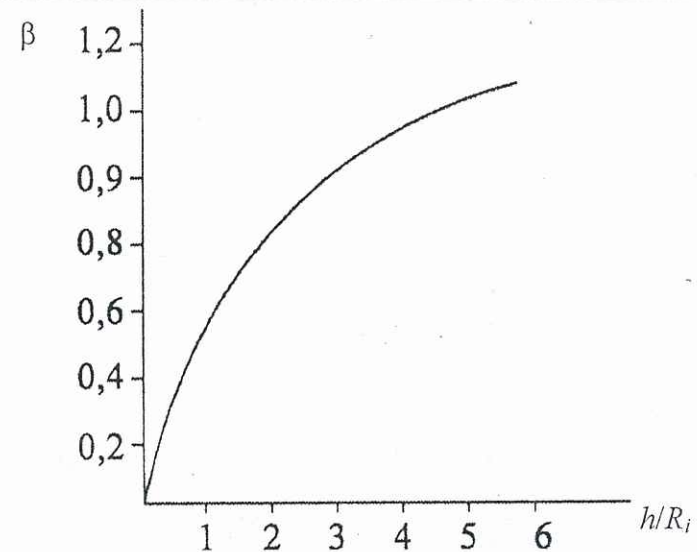


Рис. 36. Зависимость коэффициента формы  $\beta$  от отношения  $h/R_i$

Активное сопротивление загрузки, Ом, определяется из формулы

$$r_s = \Pi_s \cdot \rho_n,$$

где  $\Pi_s$  – сумма параметров загрузки, см.

Для прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_n.$$

Для жесткого каркаса и прутковой арматуры конструкции в неметаллической опалубке

$$\Pi_s = \pi \cdot d_n + \frac{F_k^n}{h}.$$