

ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ТЕПЛОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПО ОКРУЖНОСТИ И РАДИУСУ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ.

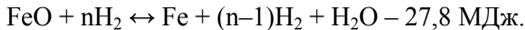
Приазовский государственный технический университет

Основной трудностью при определении рудных нагрузок (РН) по радиусу печи является отсутствие значения угла наклона поверхности засыпи. Показано, что при значениях углов наклона поверхности засыпи в пределах 20–28° можно применять представленные автором формулы в широком диапазоне доменной плавки

Газопроницаемость столба шихтовых материалов по окружности и радиусу доменной печи определяет соответствующее движение печных газов, а следовательно, и равномерность хода доменной печи. Известно, что от качества распределения шихты и газов зависит соотношение косвенных и прямых реакций восстановления оксидов железа и других металлов. При косвенном восстановлении (газовыми восстановителями CO и H₂) энергетические затраты значительно ниже, по сравнению с прямым восстановлением (твердым углеродом). Так, например, восстановление Fe₂O₃ монооксидом углерода (CO) до металлического железа сопровождается выделением около 20 МДж тепла на каждую молекулу Fe₂O₃. При прямом восстановлении монооксида железа (FeO) до металлического железа (Fe₂O₃ и Fe₃O₄ и частично FeO в доменной печи всегда восстанавливаются косвенным путем) затрачивается тепло:



На восстановление FeO косвенным путем водородом затрачивается небольшое количество тепла:



Поскольку основное косвенное восстановление происходит за счет монооксида углерода, а на долю водорода приходится менее шестой части от общего количества FeO, восстановленного косвенным путем, то итоговый баланс тепла при этом будет положительным. Таким образом, затрата дорогостоящего кокса в доменной плавке тем меньше, чем больше монооксида железа восстанавливается косвенным путем. Для этого необходимо, чтобы шихта и газы по окружности печи распределялись равномерно, а по радиусу с оптимальной неравномерностью. Это объясняется тем, что дутье в печь подводится по периферии, где расположены воздушные фурмы. Сгорание углерода кокса происходит в окислительной зоне, длина которой составляет 800–1000 мм при комбинированном и 1200–1600 мм при вдувании воздуха.

Температура в фокусе горения достигает максимума 2000–2300⁰С, а у оси печи 1350–1400⁰С, то есть в осевой зоне недостаточно тепла для восстановления здесь оксидов железа и нагрева продуктов плавки до их температуры в горне. Практика доменной плавки показала, что в осевой зоне

поток газов должен составлять не менее 8% от общей их массы на площади диаметром 1,0–3,0 м в зависимости от объема печи (~ 4 % от F_{Σ}).

Умеренно развитый поток газов должен быть и в периферийной зоне, которая составляет большую поперечную площадь и от ее проницаемости во многом зависит производительность печи. В промежуточной зоне меньший поток газов и более низкая температура по всей высоте печи. Только при таком распределении потоков газа по радиусу достигается ровный сход шихты, более низкий расход кокса и большая производительность.

Распределение газов по окружности и радиусу печи во многом зависит от газопроницаемости шихтовых материалов, которая в свою очередь определяется гранулометрическим составом шихты. Многолетние и разносторонние наши исследования в данной области [1,2,3 и др.] позволили определить зависимость газопроницаемости от соотношения крупных и мелких фракций агломерата и окатышей при загрузке печей загрузочными устройствами (ЗУ) типовой конструкции.

По окружности печи масса мелочи в гребне и откосе шихты определяет газовые потоки и находится по формуле:

$$C = \frac{n(m^2 - f\tau)}{m\tau}, \quad (1)$$

где C – масса мелочи в гребне ($C_{гр.}$) или откосе ($C_{отк.}$), доля от общей массы шихты в гребне или откосе; n – содержание мелочи в гребне ($n_{гр.}$) или откосе ($n_{отк.}$), доля от общей массы мелочи; m – общее содержание мелочи в загружаемой шихте, доля от общей массы шихты; τ – количество шихты в гребне ($\tau_{гр.}$) или откосе ($\tau_{отк.}$), доля от общей массы шихты.

Установили [1, 2], что количество мелочи и общей массы агломерата в гребне ($n_{гр.}$, $\tau_{гр.}$) или откосе ($n_{отк.}$, $\tau_{отк.}$) в свою очередь, также зависят от общей массы мелочи (m) и определяются эмпирическими уравнениями:

Для гребня:

$$n_{гр.} = 0,066 + 0,71m; \quad (2)$$

$$\tau_{гр.} = 0,264m + 0,278; \quad (3)$$

Для откоса:

$$n_{отк.} = 0,71 - 0,86m; \quad (4)$$

$$\tau_{отк.} = 0,471 - 0,378m. \quad (5)$$

Значительная разница в распределении крупных кусков и мелких частиц шихты по окружности (гребень, откос) предопределяет и значительное различие эквивалентных диаметров (d_{Σ}) и коэффициентов сопротивления (Ψ), которые находят из формул:

Для гребня:

$$d_{\Sigma}^{гр.} = \frac{2,4}{(m - 0,01)}; \quad (6)$$

Для откоса:

$$d_{\Sigma}^{отк.} = \frac{1,05}{m}; \quad (8)$$

$$\Psi_{2p} = (2,4 - 0,5\Phi)(0,6 + 0,73m); \quad (7)$$

$$\Psi_{отк} = \left[2,52 - \left(\frac{\Phi^2}{2,25} \right) \right] \left(0,55 + \sqrt{\frac{m}{(32-m)}} \right), \quad (9)$$

где Φ – фактор формы.

Определив n и τ гребня и откоса по формулам (2) ÷ (5) находим там количество мелочи $C_{гр}$ и $C_{отк}$. Насыпной вес агломерата фракции 5–0 мм 1,9–2,1 т/м³, тогда объемный вес мелочи в гребне $C_{гр}/2,0$ м³ и в откосе $C_{отк}/2,0$ м³. Известно [1,2,3], что порозность зернистого слоя ε_c зависит от объемной доли мелочи (W) и находится по формуле:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{\max} - w \cdot \operatorname{arccctg} \left\{ 1,83 + 12,2 \left[\left(\frac{d_M}{d_K} \right) - 0,07 \right] \right\}, \quad (10)$$

где ε_{\max} – максимальная порозность шихты, которая измеряется в пределах 0,51–0,52, м³/м³;

d_M и d_K – соответственно диаметры самых мелких и крупных частиц слоя, м.

Газопроницаемость шихты является обратной величиной потери напора в слое (ΔP , Па), который находится по формуле [1–5 и др.]:

$$\Delta P = \frac{\Psi H U_0^2 \rho_g (1 - \varepsilon)}{2 d_{\text{э}} \varepsilon^3}, \quad (11)$$

где H – высота слоя, м; U_0 – скорость газового потока на полную площадь, м/с; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр поровых каналов, примерно, равный эквивалентному диаметру частиц слоя ($d_{\text{э.ч}}$), м; ρ_g – плотность печного газа, кг/м³.

Все входящие величины в формулу (11) находятся по формулам (1)÷(10), а $U_0 = Q/F$, где Q – объем газа, м³/с; F – площадь слоя – также находятся для соответствующих условий (гребень, откос, промежуточные зоны). выполненные нами расчеты для доменной печи полезным объемом 2002 м³, диаметром колошника 7,3 м с суточным производством 4000 т/сутки и выходом печных газов 5250 м³/мин показали, что со стороны гребня проходит газ 2132 м³/мин со скоростью 2,27 м/с; со стороны откоса 1848 м³/мин со скоростью 1,97 м/с и в промежуточной зонах между гребнем и откосом 1270 м³/мин со скоростью 2,02 м/с.

Суммарный объемный коэффициент теплопередачи в слое доменной шихты (α_V , Вт/м³·град.) определили из уравнения [2]:

$$\alpha_V = \alpha_F \left[\frac{7,5(1 - \varepsilon)}{d_{\text{э}}} \right], \quad (12)$$

где α_F – поверхностный коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град, зависит от числа Nu

$$\alpha_F = Nu \lambda_{\Gamma} / d_{\text{Э}}, \quad (13)$$

где λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

В свою очередь число Nu по данным [6] равно:

$$Nu = 0,61 Re^{0,67}; \quad (14),$$

$$Re = U_0 d_{\text{Э}} / \nu \quad (15)$$

где ν – кинематическая вязкость газа, м²/с, которая равна $\nu = \eta / \rho_{\Gamma}$; ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³.

Подставив в формулу (12) значения Nu и Re , находим

$$\alpha_F = 0,61 \beta \left[\frac{(U_0 \rho_{\Gamma} d_{\text{Э}})^{0,67}}{d_{\text{Э}} \varepsilon^{0,67}} \right] \quad (16)$$

$$\text{где } \beta = \lambda_{\Gamma} / \eta_{\Gamma}^{0,67}; \quad \lambda_{\Gamma} = \Sigma (\lambda_{T_i} V_i) / \Sigma V_i \quad (17)$$

где λ_{T_i} – коэффициент теплопроводности i -того шихтового материала (кокса, агломерата, окатышей, добавок), Вт/м*град.;

V_i – объем i -того материала, м³;

ΣV_i – суммарный объем слоя шихты, м³.

Для наших условий (ДП 2002 м³) расчеты показали:

$$\alpha_F^{\text{гп}} = 227 \text{ ВВ}(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad \alpha_F^{\text{отк}} = 210 \text{ ВВ}(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_F^{\text{пр.з.}} = 217 \text{ ВВ}(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

При известном числе Нуссельта (Nu) коэффициент массопередачи (β) можно рассчитать по формуле:

$$\beta = Nu \left(\frac{a}{D} \right)^{1/3} \left(\frac{D}{d_{\text{Э}}} \right), \quad (18)$$

где a – температуропроводность, м²/с; D – коэффициент диффузии газа в пограничном слое, м²/с.

Из формулы (18) с учетом $Nu = C^1 Re^n$ следует:

$$\beta = c \left(U^n D_p / d_{\text{Э}}^{1-n} \right) \left(a / D \right)^{1/3}, \quad (19)$$

где $\alpha = \frac{\lambda_z}{c_p \rho_z}$, м²/с; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(м²*с).

Для агломерата, руды и окатышей $n = 0,7$, $c' = 0,3$ и при обозначении постоянных и малоизменяющихся величин в формуле (19) через $C'' = C'D^{0,67}$ коэффициент массопередачи равен:

$$\beta = C'' U^{0,7} / d_3^{0,3}, \quad (20)$$

где U – фактическая скорость газа, м/с.

Следовательно, массообмен в доменной печи и других шахтных печах является зависимым от $U^{0,7} / d_3^{0,3}$. Поскольку не было экспериментальных

данных по определению C'' , то расчеты массообмена в доменной печи не рассчитывали.

Определение газовых потоков и потерь их напора по радиусу доменной печи провели для тех же условий, что и по окружности печи. Следовательно, объем агломерата $13,69 \text{ м}^3$, кокса 14 м^3 . Общий объем подачи $13,69 + 14 = 27,69 \text{ м}^3$. Объем мелочи (32,5 %) $4,04 \text{ м}^3$ или в долях $0,146$. Тогда для $m_\Sigma = 0,146$ порозность свободно насыпанного слоя будет равна $0,42 \text{ м}^3/\text{м}^3$ рис.1 и при загрузке с конуса:

$$\varepsilon_\Sigma^K = 0,9 \cdot 0,42(1,06 + 0,4m) = 0,423,$$

где $m = 0,146$ объемная доля мелочи.

Для прямых подач порозность в периферийной, промежуточной и центральной зонах, равных по площади, определяли по формулам:

$$m_{\text{пер.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 1,3 m_\Sigma - 0,3 m_\Sigma^2 = 1,3 \cdot 0,146 - 0,3 \cdot 0,146^2 = 0,183 ;$$

$$m_{\text{пр.з.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 1,57 m_\Sigma - 0,57 m_\Sigma^2 = 1,57 \cdot 0,146 - 0,57 \cdot 0,146^2 = 0,217 ;$$

$$m_{\text{ц.з.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 0,1 m_\Sigma + 0,9 m_\Sigma^2 = 0,034 ,$$

Тогда порозность свободно насыпанного слоя для объемной доли мелочи $0,183$ составит $\varepsilon_C^{\text{пер.}} = 0,40$ и для $0,217 - \varepsilon_C^{\text{пр.з.}} = 0,38$; для $0,034 - \varepsilon_C^{\text{ц.з.}} = 0,48$.

При загрузке прямых подач с конуса

$$\varepsilon_{\text{пер.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 0,9 \cdot 0,4(1,06 + 0,4 \cdot 0,183) = 0,41; \quad \varepsilon_{\text{пр.з.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 0,39 ;$$

$$\varepsilon_{\text{ц.з.}}^{\text{ААКК} \downarrow} = 0,46$$

Соответственно для подач коксом вперед объемные доли мелочи в 3^х зонах составят по формуле, доли:

$$m_{\text{пер.}}^c = 0,6 m_{\Sigma} + 0,04 = 0,128 \quad ;$$

$$m_{\text{пр.з.}}^c = 2 m_{\Sigma} - 0,96 m_{\Sigma}^2 = 0,271 \quad ;$$

$$m_{\text{ц.з.}}^c = 0,14 m_{\Sigma} + 0,8 = 0,037 \quad .$$

Для указанных значений $m_{\text{пер.}}$; $m_{\text{пр.з.}}$; $m_{\text{ц.з.}}$,

соответствующих доле мелочи в периферийной, промежуточной и центральной зонах колошника, но свободно засыпанной шихты, порозность слоя составит:

$$\varepsilon_{\text{пер.}}^c = 0,43 \quad ; \quad \varepsilon_{\text{пр.з.}}^c = 0,365 \quad ; \quad \varepsilon_{\text{ц.з.}}^c = 0,47 \quad .$$

При загрузке с конуса подач коксом вперед порозность составит [1,2,7], м³/м³:

$$\varepsilon_{\text{пер.}}^k = 0,9 \cdot 0,43(1,06 + 0,43 \cdot 0,128) = 0,43;$$

$$\varepsilon_{\text{пр.з.}}^k = 0,9 \cdot 0,365(1,06 + 0,4 \cdot 0,271) = 0,38;$$

$$\varepsilon_{\text{ц.з.}}^k = 0,9 \cdot 0,47(1,06 + 0,4 \cdot 0,037) = 0,46.$$

Распределение газовых потоков газопроницаемость обратно пропорциональна ΔP и аналогично симплексу $\varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)$ [1-5]. Для прямых подач V_{Γ} в трех радиальных зонах при выходе газа 5250 м³/мин (ДП $V_{\text{пол}} = 2002 \text{ м}^3$) составляет:

	%	м ³ /мин	U ₀ , м/с
$V_2^{\text{пер.}} = 0,41^3 / (1 - 0,41) = 0,117$	29,7	1559	1559/13,91·60 = 1,87
$V_2^{\text{пр.з.}} = 0,39^3 / (1 - 0,39) = 0,097$	24,6	1292	1292/13,9·60 = 1,55
$V_2^{\text{ц.з.}} = 0,46^3 / (1 - 0,46) = 0,180$	45,7	2399	2399/139·60 = 2,88
Итого: 0,39	100,0	5250	5250/41,81·60=2,09

Для подач коксом вперед газовые потоки составят соответственно:

$$V_2^{nep.} = 1700 \text{ м}^3/\text{мми} \text{ и } U_0 = 2,15 \text{ м/с};$$

$$V_2^{np.3.} = 1145 \text{ м}^3/\text{мми} \text{ и } U_0 = 1,37 \text{ м/с};$$

$$V_2^{u.3.} = 2315 \text{ м}^3/\text{мми} \text{ и } U_0 = 2,78 \text{ м/с};$$

$$\text{Итого } 5250 \text{ м}^3/\text{мми} \text{ и } U_0 = 2,09 \text{ м/с}.$$

По формулам (12) – (17) определили поверхностный коэффициент теплопередачи $\alpha_{\Sigma F}$ для радиальных зон периферийной, промежуточной и центральной при загрузке прямых подач [2, 7]:

$$\alpha_{\Sigma F}^{nep.} = 414 \text{ ВВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma F}^{np.3.} = 363 \text{ ВВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma F}^{u.3.} = 404 \text{ ВВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

При загрузке обратных подач:

$$\alpha_{\Sigma F}^{nep.} = 412 \text{ ВТ}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma F}^{np.3.} = 344 \text{ ВТ}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma F}^{u.3.} = 422 \text{ ВТ}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Во время определения поверхностного коэффициента теплопередачи эквивалентный диаметр поровых каналов считали примерно равным эквивалентному диаметру частиц слоя $d_{э.ч.}$, м:

$$d_{э.ч.} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (V_i / d_{cp.i.})}, \quad (21)$$

где V_i – объемная доля i -той фракции; d_i – средний диаметр частиц i -той фракции, м.

Зная поверхностные коэффициенты теплопередачи по окружности и радиусу доменной печи можно определить объемные коэффициенты теплопередачи α_v по известной формуле:

$$\alpha_v = \alpha_F [7,5(1 - \varepsilon) | d_3] \text{ ВВт}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}), \quad (22)$$

а затем и удельные тепловые потоки q , $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$$q = \alpha_{\Sigma F} (t_2 - t_{ш}), \quad (23)$$

где t_r – температура газа, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ш}$ – температура шихты, $^{\circ}\text{C}$.

Неравномерное распределение по окружности и радиусу доменной печи шихтовых материалов и печных газов приведет к такому же нерав-

номерному теплообмену между ними. Суммарный коэффициент теплопередачи увеличивается с уменьшением эквивалентных частиц слоя, то есть с увеличением доли мелочи (0–3 мм).

Изменение теплообмена в слое шихты по горизонтальным и вертикальным сечениям печи адекватно симплексу $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$. Поэтому для определения поверхностного или объемного коэффициента теплообмена достаточно знать гранулометрический состав шихтовых материалов, по которому определяются объемная доля мелочи, порозность слоя и скорости газовых потоков по окружности и радиусу доменной печи.

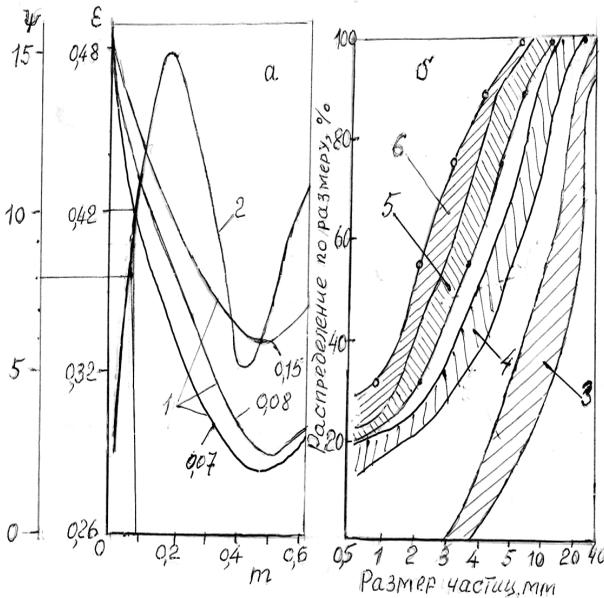


Рис.1. Изменение порозности и коэффициента сопротивления в зависимости от доли мелочи $m(a)$, а также показано измельчение агломерата в шахте ДП4 Муроран Яп. (б)% 1 – изменение порозности; 2 – коэффициент сопротивления; 3 – гранулометрический состав загружаемого агломерата; 4,5,6 – соответственно на расстоянии от поверхности засыпи на 4,2; 8,6 и 13 м.

Кроме того, можно судить о радиальном распределении газовых потоков по рудным нагрузкам (РН) [2, 5]. При этом учитывается с достаточной точностью и достоверностью величина РН в зависимости от уровня засыпи и угла наклона поверхности шихты на колошнике доменной печи.

При загрузке прямыми подачами РН в периферийной зоне ($N_{п}$, т/т) в условиях угла наклона поверхности засыпи $20-32^\circ$ и уровне 0,5–3,0 м составит:

$$N_{п} = (0,69h_3 + 2,33) \left(1,6 - 2,44 \cdot 10^{-2} \alpha\right) \quad (24)$$

$A_2 K_2 \downarrow \alpha (32^\circ)$

В центральной зоне ($N_{ц}$, т/т):

$$N_{\Pi} = (4,19 - 0,86h_3) \left(44,3 \cdot 10^{-2} \alpha - 0,25 \right), \quad (25)$$

$$A_2 K_2 \downarrow \alpha \langle 32^\circ$$

где h – уровень засыпи, м; α – угол наклона поверхности шихты, град.

При загрузке шихты обратными подачами в периферийной и центральной зонах рудная нагрузка составит:

$$N_{\Pi} = (0,52 + 0,68h_3) (1,7 - 0,03\alpha). \quad (26)$$

$$K_2 A_2 \downarrow \alpha \langle 32^\circ$$

$$N_{\Pi} = (5,32 - 0,92h_3) \left(5,6 \cdot 10^{-3} \alpha - 0,975 \right), \quad (27)$$

$$K_2 A_2 \downarrow \alpha \langle 32^\circ$$

Для загрузки подач одним коксом вперед РН в указанных зонах составляет:

$$N_{\Pi} = (0,52 + 0,68h_3) (1,7 - 0,03\alpha),$$

$$K A_2 K \downarrow \alpha \langle 32^\circ$$

то есть как и в случае загрузки обратных подач, а в центральной зоне:

$$N_{\Pi.з.} = (5,02 + 0,52h_3) \left(11,25 \cdot 10^{-3} \alpha + 0,53 \right), \quad (28)$$

$$K A_2 K \downarrow \alpha \langle 32^\circ$$

Таким образом, по формулам (24) ÷ (28) можно определить величину рудной составляющей для периферии и центра печи в зависимости от уровня засыпи и наклона ее поверхности во время загрузки шихты прямыми подачами и коксом вперед. Независимо от угла наклона поверхности засыпи шихты на колошнике доменной печи масса рудной составляющей подачи в промежуточной зоне мало меняется и на 12–14 % выше суммарной рудной нагрузки.

Основной трудностью при определении РН по радиусу печи по указанным формулам (24) ÷ (28) является отсутствие значения угла наклона поверхности засыпи. Однако его значение для определенных условий меняется обычно в пределах $20-28^\circ$, что позволяет применять формулы (24) ÷ (28) в широком диапазоне доменной плавки.

1. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса.– 2^е изд. перер. и доп.– М.: Металлургия.– 1990.– 216 с.
2. Тарасов В.П., Тарасов П.В. Теория и технология доменной плавки.– М.: Интермет Инжиниринг, 2007.– 384 с.
3. Тарасов В.П. Потери напора по сечению печи в реальных условиях доменной плавки // Сталь.– 1979.– №1. – С.11–12.

4. *Богданди П.Ф., Энгель Г.Ю.* Восстановление железных руд/ Перев. с нем.– М.: Metallургия, 1971.– 520 с.
5. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Metallургия.–1990.–256 с.
6. *Доменное производство: Справочное издание: В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Вегмана Е.Ф.* –М.: Metallургия, 1989. – 496 с.
7. *Тарасов В.П., Тарасов П.В.* Массо- и теплообменные процессы по радиусу доменной печи // Бюллетень Черметинформация. – №6. –2007. – С.21–24.

Сведения об авторе:

Тарасов Владимир Петрович, докт.техн.наук, профессор, Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь)