

Исследование газодисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь

Представлены результаты численных расчетов двухскоростного течения в уже изготовленной форсунке для подачи пылеугольного топлива в фурменную зону доменной печи. Показано, как изменение концентрации порошка, диаметр частиц и их динамическое отставание влияет на распределение газодинамических параметров вдоль топливной форсунки.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, топливная форсунка, концентрация порошка, скорость частиц

Постановка задачи. Из общего баланса топливных ресурсов ПАО ММК им. Ильича доменный цех потребляет $\approx 60\%$. Пусковые испытания системы подачи пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменных печей № 1, 3, 4 показали, что в короткое время (сентябрь-октябрь 2012 г.) без преодоления больших технологических проблем расход угля можно довести до 120 кг/т чугуна, а расход кокса – снизить на 80-100 кг/т чугуна. В отдельные дни пусконаладочных работ в доменном цехе комбината расход ПУТ достигал 180 кг/т чугуна.

Малое пространство окислительной зоны области фурменного очага (ФО) имеет большое значение для протекания процессов в доменной печи, особенно, если вдувается пылеугольное топливо. Однако до конца невыясненными остаются проблемные вопросы полноты сгорания угля в пределах фурменной зоны. Прежде всего, нужны научно обоснованные рекомендации по конструктивному решению и месту установки пылеугольной форсунки. Эта задача является весьма актуальной, так как после внедрения ПУТ-технологии только на ММК им. Ильича через ≈ 90 форсунок в 5 доменных печей будут вдувать ≈ 1 млн т угля в год. Ускоренные темпы внедрения ПУТ на 4 меткомбинатах Украины вызывают необходимость в разработке современных методов расчета форсунки для подачи угля в фурменную зону.

Методов расчета топливных форсунок, предназначенных для вдувания угольной пыли в доменные печи, в металлургической литературе не найдено. Следует также отметить, что по одному из ключевых вопросов технологии ПУТ – полноте сгорания топлива в фурменном очаге – также нет единой точки зрения. В работе [1], где проведен физический эксперимент, сказано буквально следующее: «Общепринято, что при высоких расходах ПУТ (150-200 кг/т) степень его сгорания в фурменных зонах даже с учетом реакции Будуара составляет порядка 70 %».

Имеются и другие мнения специалистов. Результаты исследований, проведенных с использованием пылеугольного топлива фракционного состава 0,010-0,036 мм на печах № 1 и 2 ЗАО «ДМЗ» показали, что при расходе угля 50-150 кг/т чугуна на расстоянии

0,6-0,8 м от среза воздушной фурмы обеспечивается почти полное сгорание угля [2]. В этой работе показано, что в зависимости от расхода кислорода общее время горения угля составляет $\tau = 0,035-0,065$ с. Такие существенные расхождения по принципиальному вопросу вызывают необходимость провести примерный расчет времени пребывания частицы угля в фурменной зоне.

В условиях доменных печей № 1, 3, 4 ММК им. Ильича, где абсолютное давление торможения перед фурмами составляло $p_0 \approx 0,37$ МПа, в фурменном очаге будет равно $p_1 = p_{ф.о} = 0,278$ МПа. Принимая коэффициент потери полного давления в дутьевой фурме $\sigma = 0,8$ по газодинамической функции давления $\pi(\lambda_1) = p_1/\sigma p_0 = 0,278/0,8 \cdot 0,37 = 0,939$ найдем коэффициент скорости $\lambda_1 = w_1/a_{кр} = 0,325$. Тогда при нагреве дутьевого воздуха до $t_1 = t_0 = 1050$ °С получим, что его скорость на выходе из сопла фурмы горячего дутья составляет $w_1 = \lambda_1 a_{кр} = \lambda_1 \sqrt{2k/(k+1)RT_0} = 0,325 \sqrt{(2 \cdot 1,4)/(1,4+1) \cdot 287 \cdot 1323}$. Если топливная форсунка установлена в дутьевой фурме, то частицы по скорости значительно отстают от несущего газа, причем коэффициент динамического запаздывания частиц $\psi = w_2/w_1$ будет существенно зависеть от дисперсности порошка. Принимая $\psi = 0,5$, получим, что скорость вылета частиц порошка угля из фурмы горячего дутья составляет $w_2 \approx 109$ м/с. Тогда средняя скорость частиц угля в фурменной зоне будет равна $w_{2cp} = (109 + 40)/2 = 75$ м/с. При принятых выше условиях время пребывания частицы в фурменном очаге длиной $l \sim 1,9$ м составляет $\tau = 0,025$ с.

Поэтому представляет особый практический и теоретический интерес то, с какой скоростью частицы пылеугольного топлива влетают в фурменный очаг, если форсунка размещена вне фурмы горячего дутья.

Цель настоящей работы – исследование влияния массовой концентрации порошка μ , диаметра частиц δ на коэффициент аэродинамического сопротивления C_D , силу межфазного взаимодействия F_{12} , изменение давления p , скорости газа w_1 , частиц w_2 и местную объемную долю ε_2 порошка по длине форсунки l .

Через топливную форсунку в фурменный очаг доменной печи подают газозвесь в широком диапазоне изменения расхода порошка m^2 и диаметра частиц δ . Аналитические исследования проводили применительно к установленной на ДП № 1, 3 и 4 ММК им. Ильича форсунке длиной $l = 2,15$ м внутренним диаметром $D = 12$ мм. Форсунка установлена сбоку фурмы горячего дутья (рис. 1).

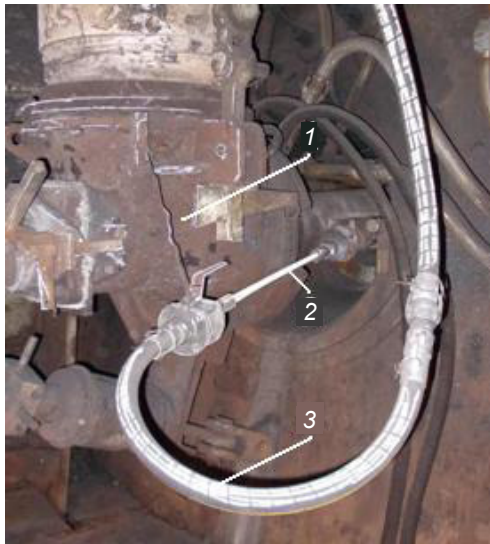


Рис. 1. Установка форсунки для подачи пылеугольного топлива в фурменный очаг: 1 – фурма горячего дутья; 2 – форсунка для подачи пылеугольного топлива в фурменную зону; 3 – гибкий резиноканевый рукав

Часть трубки длиной ≈ 400 мм выступает в фурменной зоне – эта часть форсунки не футерована и охлаждается только газозвесью. Через гляделку в воздушной фурме 1 можно наблюдать четко видимую темную расширяющуюся полосу истекающей из форсунки пылеугольной струи длиной $\approx 200-250$ мм.

Математическая модель. Система уравнений квазиодномерного квазистационарного двухфазного течения в двухскоростном приближении, идеи которых представлены в работе [3], имеет следующий вид:

– уравнение совместного движения фаз

$$\frac{dp}{dx} = -\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} - \varepsilon_2 \rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dx} - F_{1w} - F_{2w} + g(\varepsilon_1 \rho_1 + \varepsilon_2 \rho_2); \quad (1)$$

– уравнение движения несущего газа

$$\varepsilon_1 \frac{dp}{dx} = -\varepsilon_1 \rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} + F_{12} - F_{1w} + \varepsilon_1 \rho_1 g; \quad (2)$$

– уравнение совместного движения фаз

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1. \quad (3)$$

Угольный порошок считали монодисперсным. Ось x направлена вдоль оси форсунки.

В уравнениях (1-3) приняты следующие обозначения: w_1, w_2 – скорости несущего газа и частиц порошка, м/с; p – статическое давление в произвольном сечении форсунки, Па; ρ_1, ρ_2 – плотности газонесителя и порошка, кг/м³; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – местные объемные доли несущего газа и частиц порошка; F_{1w}, F_{2w}, F_{12} – приведенная сила трения газа и частиц о стенку трубки

форсунки и сила межфазного взаимодействия, Н/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

В уравнении (2) силу межфазного взаимодействия рассчитывали [3]

$$F_{12} = 0,75 C_D \rho_1 \varepsilon_2 |w_1 - w_2| (w_1 - w_2) / \delta, \quad (4)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления; δ – эквивалентный диаметр частицы, м; ρ_1 – плотность газонесителя, кг/м³.

Коэффициент C_D в зависимости от числа Рейнольдса Re_{12} вычисляется по известному соотношению

$$C_D = \frac{24}{Re_{12}} (1 + 0,179 \sqrt{Re_{12}} + 0,013 Re_{12}) \varepsilon_1^{-2n}; \quad (5)$$

где число Рейнольдса $Re_{12} = (w_1 - w_2) \delta / \nu$; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; n – коэффициент структуры потока.

Силу трения каждой из фаз о стенку находили по формуле

$$F_{iw} = \zeta_i \varepsilon_i \rho_i w_i^2 / (2D). \quad (6)$$

Коэффициент трения ζ_1 и ζ_2 определяли, как в работе [4].

Граничные условия. На входе в фурму ($x = 0$) задавали температуру газа и дисперсной примеси $T_1 = T_0, T_2 = b_t T_0$, где b_t – коэффициент температурного скольжения фаз. Так как заданы постоянные расходы фаз G_1, G_2 , то скорости газа w_1 и частиц w_2 , а также давление на входе не задавали, а рассчитывали. Необходимо в сечении $x = 0$ лишь задать коэффициент динамического скольжения фаз $\psi = w_2 / w_{1x=0} < 1$, который в дальнейшем рассчитывали. На выходе из фурмы задавали только давление в фурменном очаге $p_{\phi.o}$ – его в расчетах не изменяли.

Для совместного решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений (их около 30) использовали метод стрельбы [5], который был реализован следующим способом. Задавали некоторое произвольное значение давления на входе в фурму $p_0 > p_{\phi.o}$. По разностным уравнениям четвертого порядка аппроксимации вычисляли значения сеточных функций, по которым определяли $w_1, w_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \rho_1, \rho_2$.

Значение давления, полученное в последней точке p_N , сравнивали с $p_{\phi.o}$. Если $|\Delta p| = |p_N - p_{\phi.o}| = 0,005$, вычисления прекращали, иначе начальное давление принимается равным $p_0^{(k)} = p_0^{(k-1)} - \Delta p / 2$ и итерации продолжали.

Исходные данные. В расчетах использовали длину форсунки $l = 2,15$ м, внутренний диаметр $D = 12$ мм. Расход несущего газа (азот N_2) был равен $V_n = 18$ м³/ч, расход порошка – $m_2 = 22,5$ кг/мин (кроме рис. 2 и 3), чему соответствовала концентрация порошка $\mu = 60$ кг/кг (кроме рис. 2 и 3). Диаметр частиц был равен $\delta = 0,1$ мм (кроме рис. 4 и 5). Принимали, что коэффициент формы частиц равен $f = 1,3$, абсолютное давление в фурменном очаге $p_{\phi.o} = 0,278$ МПа, а плотность угольного порошка $\rho_2 = 1700$ кг/м³.

Результаты расчета и их анализ. В любой расчетной модели двухскоростного течения газозвеси важнейшими параметрами, влияющими на конечный результат, являются коэффициент аэродинамического

сопротивления частицы C_D и сила межфазного взаимодействия F_{12} . Напомним, что физический смысл $C_D = F/(0,5\rho w^2)$ – это отношение силы сопротивления при движении частиц в потоке к динамическому давлению. Коэффициент C_D , как и число Рейнольдса, являются функцией многих переменных, но наибольшее влияние на C_D оказывают концентрация порошка μ и разность скоростей фаз Δw . Из рис. 2 следует, что

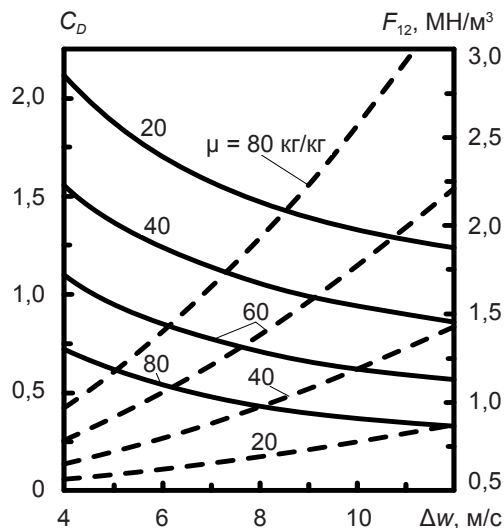


Рис. 2. Влияние концентрации порошка μ и разности скоростей фаз Δw на коэффициент аэродинамического сопротивления C_D (—) и силу межфазного взаимодействия F_{12} (---)

чем больше Δw , тем меньше C_D при любом значении μ . Частица порошка не воспринимает разность давлений по длине трубки – ее переносит вязкая газовая фаза потока. Чем меньше Δw , тем больше необходимо затратить энергии потока, тем больше диссипация этой энергии. Это также следует из формулы (5). Но в уравнении (4) сила F_{12} зависит от разности Δw^2 . Поэтому, при всех прочих равных условиях, с увеличением Δw сила F_{12} возрастает (чтобы уменьшить отставание частиц от несущего газа, нужно приложить большую силу). Концентрация μ пылеугольного топлива в смеси существенно влияет на давление p перед форсункой и его изменение по длине l (рис. 3).

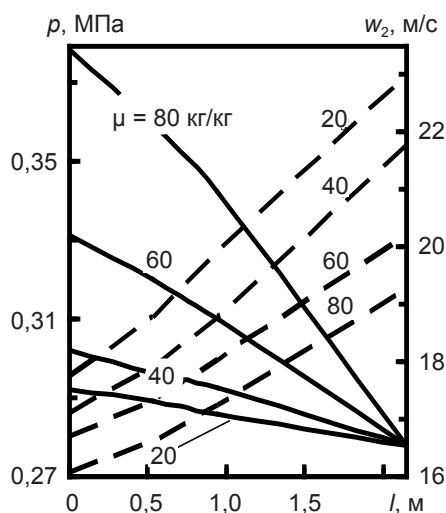


Рис. 3. Распределение давления p (—) и скорости частиц w_2 (---) по длине l форсунки при различной концентрации порошка μ

При заданном диаметре D (и площади сечения s) трубки форсунки изменение расхода $m_2 = \epsilon_2 \rho_2 w_2 s$ достигается как за счет скорости w_2 , так и объемной доли ϵ_2 . Например, при $V_n = 18 \text{ м}^3/\text{ч} = \text{const}$ увеличение концентрации μ с 20 до 60 кг/кг, а расхода порошка m_2 с 7,5 до 22,5 кг/мин приводит к увеличению объемной доли ϵ_2 с 0,032 до 0,094, а скорость w_2 частиц возрастает незначительно. Характерно, что при любом μ выполняются граничные условия решения дифференциальных уравнений (1) и (2) – при числе Маха в выходном сечении $M < 1$ (в наших расчетах $M \sim 0,1$) давление на срезе трубки фурмы p_1 и в фурменном очаге равны, то есть $p_1 = p_{\text{ф.о}} = 0,278 \text{ МПа}$ (рис. 3).

На газодинамические параметры двухфазного потока в доменной форсунке существенное влияние оказывает диаметр δ частиц угольного порошка (рис. 4).

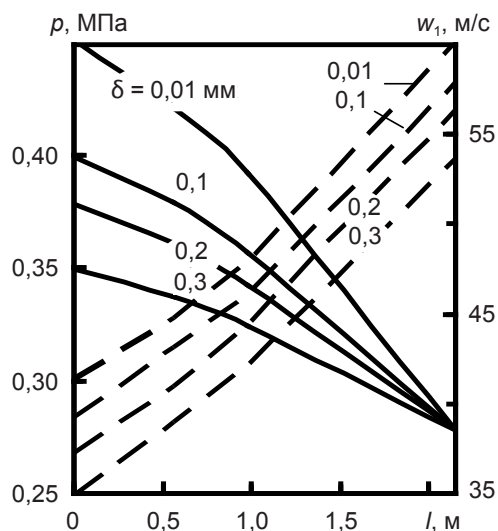


Рис. 4. Распределение давления p (—) перед фурмой и скорости азота w_1 (---) на глубине h при различном диаметре частиц δ по длине форсунки l

Сравнительные расчеты проводили при одинаковых расходах m_2 и V_n и при $\mu = 60 \text{ кг/кг}$. Видно, что чем меньше δ , тем выше давление p в любом сечении по длине l форсунки. Чем ближе к входному сечению ($l \rightarrow 0$), тем больше влияние размера порошка δ на давление p . Например, при $l = 0$ уменьшение δ с 0,3 до 0,01 мм (и $m_2 = \text{const}$ и $V_n = \text{const}$) требует повышения давления p перед форсункой с 0,35 до 0,45 МПа. Рост давления p объясняется тем, что в рассмотренном примере число частиц увеличивается в $\delta_{0,3}^3/\delta_{0,01}^3 = 27 \cdot 10^3$, а поверхность трения – в $\delta_{0,3}^2/\delta_{0,01}^2 = 900$ раз. Характерно, что из-за роста давления p скорость газонесителя w_1 возрастает при любом значении δ .

Как следует из уравнения неразрывности для твердой фазы, записанной в форме $w_2 = m_2/(\epsilon_2 \rho_2 s)$, скорость частиц w_2 зависит только от местной объемной доли порошка в газе, которая рассчитывается как $\epsilon_2 = (1 + \psi \rho_2/(\mu \rho_1))^{-1}$. Таким образом, связь между p , w_1 , ϵ_2 , ψ , μ , ρ_1 и ρ_2 довольно сложная, но при численном решении задачи четко подтверждается физически неоспоримая закономерность – если течение в трубе дозвуковое, то скорость газа, вне зависимости от воздействия на поток различных факторов, только увеличивается.

Как следует из уравнения неразрывности для твердой фазы, записанной в форме $\varepsilon_2 = m_2/(\rho_2 w_2 s)$, если частицы по длине l ускоряются, то при $m_2 = \text{const}$, $\rho_2 = \text{const}$, $F = \text{const}$, объемная доля ε_2 снижается (рис. 5). Например, на срезе трубки форсунки ($l = 2,15$ м) при понижении δ с 0,3 до 0,01 мм скорость w_2 возрастает от 21 до 42 м/с, а ε_2 снижается с 0,088 до 0,044.

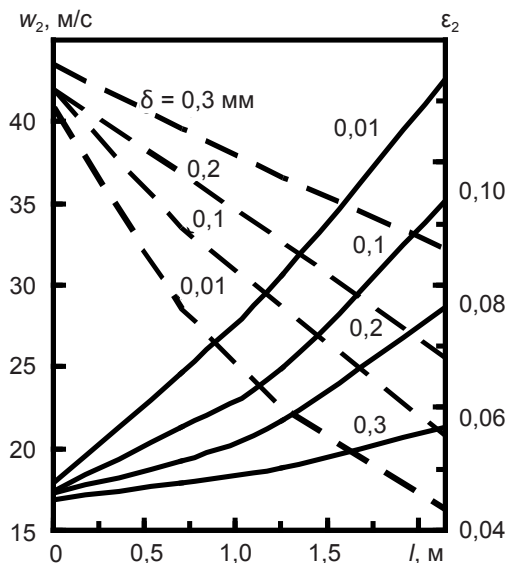


Рис. 5. Изменение скорости w_2 частиц (—) и объемной доли угольного порошка ε_2 (---) по длине форсунки l при различном диаметре частиц δ

Адекватность модели. Для подтверждения правильности численных расчетов проводят, как правило, физический эксперимент, но в фурменном очаге выполнить его затруднительно. Для проверки адекватности модели применим метод тестирования. Так, если:

– течение дозвуковое, то в выходном сечении трубки форсунки давление p не зависит от многочисленных физических воздействий, а равно только давлению в фурменном очаге, $p_1 = p_{ф.о}$ (рис. 2 и 4);

– диаметр порошка δ увеличивается, то при постоянном расходе количество частиц и поверхность трения снижается, что, естественно, приводит к падению давления p (рис. 4);

– течение дозвуковое (наш случай), то по закону обращения воздействия любой поток в трубке ускоряется (рис. 4 и 5);

– чем тоньше помол угля (меньше δ), тем ниже динамическое запаздывание ψ частицы, тем выше ее скорость w_2 , что не вызывает сомнений (рис. 5).

Визуальные наблюдения четко видимой пылеугольной струи через гляделку фурменного прибора доменных печей № 1, 3, 4 МК им. Ильича показывают, что действительная скорость истечения угольного порошка из форсунки умеренная, что и было получено расчетом с использованием численных методов.

В дальнейшем исследование течения пылеугольного топлива желательно проводить с учетом нагрева газозвеси в той части трубки форсунки, которая выступает в фурменную зону.

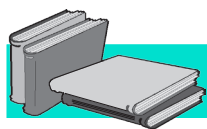
Выводы

Разработана методика газодинамического расчета топливной форсунки доменных печей с учетом изменения в широком диапазоне главных параметров газозвеси – концентрации порошка μ и диаметра частиц δ .

При газодинамических расчетах впервые параметры газопорошкового потока по длине форсунки для вдувания пылеугольного топлива в доменную печь были разделены пофазно.

Показано, что на пылеугольных форсунках доменных печей № 1, 3, 4 МК им. Ильича в широком диапазоне изменения расхода порошка ($m_2 = 7,5-30$ кг/мин) скорость истечения частиц угля остается умеренной ($w_2 = 48-22$ м/с).

Для обеспечения полноты сгорания угля топливную форсунку, расположенную вне дутьевой фурмы, следует выполнять как коаксиальную топливно-кислородную, чего специалисты не рекомендуют делать при расположении форсунки в дутьевой фурме.



ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах / А. И. Бабич, Д. Г. Зенк, Г. В. Гудену и др. // Труды международной научно – технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна» Донецк: УНИТЕХ. – 2006. – С. 181-192.
2. Кочура В. В. Исследования полноты сгорания пылеугольного топлива, вдуваемого в горн доменной печи № 2 ЗАО «Донецксталь» – металлургический завод // Там же. – 2006. – С. 255-256.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. – Ч. 1 – М: Наука. – 1987. – 464 с.
4. Косолап Н. В. Харлашин П. С., Куземко Р. Д. Моделирование подачи высокоплотного потока угольной пыли в доменную печь // Сталь. – 2010. – № 1. – С. 13-17.
5. Пасконов В. М., Полежаев В. Н., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.

Анотація

Косолап М. В., Куземко Р. Д.

Дослідження газодисперсної течії в форсунці для подачі пилоугольного палива в доменну піч

Представлено результати чисельних розрахунків двохшвидкісної течії у виготовленій форсунці для подачі пилоугольного палива в фурменну зону доменної печі. Показано, як зміна концентрації порошку, діаметр частинок та їх динамічне відставання впливає на розподіл газодинамічних параметрів вздовж паливної форсунки.

Ключові слова

пилувугільне паливо, паливна форсунка, концентрація порошку, швидкість часток

Summary

Kosolap N. V., Kuzemko R. D.

The research of the gas-dispersed flow in a nozzle for the pulverized coal injection into a blast furnace

The results of numerical calculations of the two-speed flow in the already made nozzle for the pulverized coal injection in blast furnace tuyere zone are given. It is shown how the change of powder concentration, particle size and their dynamic lag influences on the distribution of dynamic parameters along the fuel injector

Keywords

pulverized coal, fuel nozzle, powder concentration, particle velocity

Поступила 12.12.12

УДК 666.76:621.74.041

Т. В. Лысенко, Н. П. Худенко*, Н. И. Замятин, Л. И. Солоненко

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

*Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса

Использование метода анализа иерархий для выбора оптимального состава противопригарных покрытий замороженных форм

Исследованы четыре состава противопригарных покрытий на газопроницаемость, седиментационную стойкость, кроющую способность и оптимальную плотность, определены коэффициенты теплопроводности покрытий. Показано, как с помощью метода анализа иерархий можно выбрать оптимальный состав покрытия для производства алюминиевых отливок в замороженных формах.

Ключевые слова: замороженные формы, противопригарные покрытия, газопроницаемость, седиментационная стойкость, кроющая способность, оптимальная плотность, коэффициент теплопроводности покрытия, метод анализа иерархий

Способ литья в замороженные формы известен достаточно давно. Данный метод изготовления форм улучшает структуру, повышает точность и геометрию отливок, экономит формовочные материалы, и, что особенно важно в современном литейном производстве, улучшает экологию, устраняя вредные выбросы в атмосферу литейных цехов [1].

Однако способ литья в замороженные формы имеет ряд недостатков, связанных с образованием на поверхности отливок раковин, пор, а также повышенного пригара [2].

Для устранения данных недостатков предлагается нанесение противопригарных покрытий на поверхность замороженных форм.

Используя высококачественные противопригарные покрытия, можно существенно повысить чистоту поверхности отливки, улучшить товарный вид литья,

улучшить условия работы при выполнении очистных операций.

Выбор противопригарного покрытия замороженных форм, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям, является актуальной задачей.

Для исследований были выбраны четыре состава противопригарных покрытий на водной основе. Составы покрытий приведены в табл. 1.

С использованием стандартных методик были проведены исследования покрытий на газопроницаемость, седиментационную стойкость, кроющую способность и оптимальную плотность, определены коэффициенты теплопроводности покрытий [3].

Сравнительные характеристики покрытий приведены в табл. 2.

После проведения исследований возник вопрос об оптимальном составе противопригарного покрытия,