

УДК 669.162.16:669.162.22

Макарова И.В., Щелоков Н.С., Макаров К.Р., Зарицкий Б.Б., Ярославцев А.В.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ:
ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ**

Аннотация. Исследование посвящено влиянию размеров и очертания профиля доменной печи на процессы, протекающие в ней. Проведен сравнительный анализ различных методик расчета профиля доменных печей. Показано, что в статистических методах диаметры в основном рассчитывались на основе полезного объема печей. Однако существенным недостатком этих методов является их неспособность адаптироваться к современным условиям шихтовки и дутья, что ограничивает их практическое применение. В настоящее время при проектировании профиля доменных печей за основу берется методика, разработанная М.А. Павловым. Ее ключевая концепция заключается в учете процессов, происходящих в доменной печи, а также шихтовых и дутьевых условий. Такой подход позволяет создавать более точные и адаптируемые профили, соответствующие современным требованиям эксплуатации. Исследование подчеркивает важность учета динамики процессов и эксплуатационных условий при проектировании, что способствует повышению эффективности и производительности доменных печей. Благодаря этому методика обеспечивает оптимизацию профиля для современных промышленных задач, что способствует устойчивому развитию металлургической отрасли.

Ключевые слова: доменная печь, профиль, колошник, шахта, распар, заплечики, горн, методика расчета

Доменный процесс основан на принципе противотока материалов и газов, что обеспечивает ей высокую интенсивность тепло- и массообмена. От совершенства организации противотока зависят основные технико-экономические показатели: производительность и расход топлива.

Сегодня доменное производство достигло значительного уровня развития, и на данный момент существуют разнообразные высокоэффективные технологии для управления распределением потоков материалов и газов. Тем не менее, если профиль печи не оптимизирован, общий эффект от этих технологий может оказаться незначительным. Важно отметить, что форма рабочего пространства в данном случае служит «направляющим» элементом для взаимодействующих потоков шихты и газа.

Профиль доменной печи является ключевым фактором, определяющим технико-экономические показатели доменной плавки. Размеры и контуры профиля влияют на склонность печи к периферийному или осевому потоку, а также на стабильность работы и уровень расхода кокса. Поэтому при проектировании профиля доменных печей необходимо обеспечить стабильный и равномерный процесс, максимальное использование восстановительной способности газа и минимальный расход кокса. Это возможно лишь при соблюдении рациональных размеров и форм элементов профиля доменных печей.

Улучшение технико-экономических показателей работы печей и увеличение продолжительности их кампании невозможно без внедрения новых конструктивных решений в устройстве как самих доменных печей, так и вспомогательного оборудования. В первую очередь это касается выбора рационального профиля печей.

В России и зарубежных странах отсутствует четкая методология для проектирования профиля доменной печи. Это связано со сложностью протекающих в доменной печи процессов и отсутствием математической модели, охватывающей весь доменный процесс.

**Теоретические основы влияния размеров
и очертания элементов профиля
на работу доменных печей**

Размеры и очертания отдельных элементов профиля доменных печей значительно влияют на работу доменной печи. Высота колошника зависит от типа загрузочного устройства и в последние десятилетия с вводом в эксплуатацию современных лотковых загрузочных устройств высота колошника уменьшилась до 1700–2000 мм. Это изменение способствовало снижению потерь напора на колошнике.

Высота шахты значительно влияет на процессы восстановления, прогрева и газодинамики. Шахта является ключевым элементом профиля доменной печи, отвечающим за подготовку шихтовых материалов перед их опусканием в зону высоких температур. Она должна обеспечивать достаточное время для оптимального прогрева и косвенного восстановления шихтовых материалов. При этом шихта в шахте должна оставаться в кусковом состоянии, исключая образование вязких и пластичных масс. Наличие таких масс нарушает газораспределение в шахте, снижая степень косвенного восстановления и нарушая нагрев отдельных зон шахты. Проблема выбора высоты шахты заключается в том, что разные типы ЖРС начинают размягчаться в своем диапазоне температур. Высота шахты должна заканчиваться на изотерме, соответствующей началу размягчения самого легкоплавкого компонента. Угол наклона шахты должен обеспечить, с одной стороны, компенсацию теплового расширения шихтовых материалов при движении вниз, с другой – постоянство скорости поднимающегося газового потока. Верхняя часть шахты является наиболее

уязвимой, так как здесь происходит резкое увеличение скорости (потеря напора) газового потока из-за реакций разложения гидратов и слабых карбонатов. Решением проблемы является выполнение шахты с переменным углом наклона (перегиб шахты) на расстоянии 2-4 м от колошника (рис. 1). Это позволяет снизить вероятность возникновения верхних подвисаний [1-3].

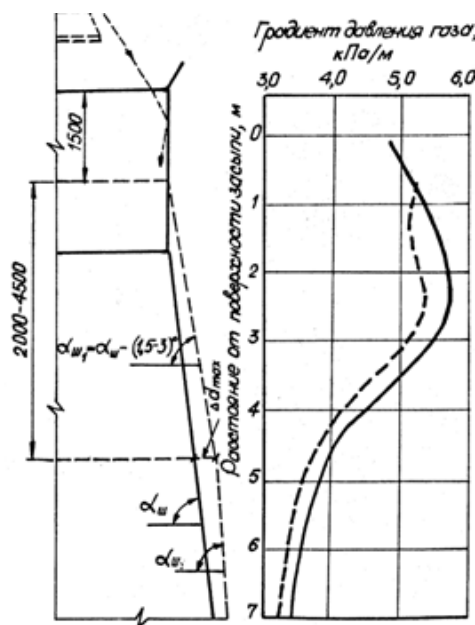


Рис. 1. Влияние очертания верха шахты на удельные потери напора газа:
— обычная шахта; --- шахта с перегибом [1, 2]

Технологической ролью распара является предоставление объема (высоты) для размещения зоны размягчения и плавления материалов. Ранее считалось, что распар не имеет четкой технологической роли и некоторые доменные печи проектировались безраспарными [2]. Однако концепция безраспарных доменных печей не получила широкого распространения. Исследования показали, что объем распара способствует улучшению прохождения газового потока через слой плохого газопроницаемых пластичных масс. Высота зоны когезии зависит от температурного интервала размягчение-плавление: чем меньше этот интервал, тем меньшей высоты можно проектировать распар. Сложность проектирования распара заключается в том, что различные виды шихтовых материалов дают вязкие массы в достаточно большом диапазоне температур. Поэтому высота распара должна быть достаточной для размещения пластичных масс всех типов шихтовых материалов.

Угол наклона заплечиков доменной печи должен способствовать снижению скорости газового потока, выходящего из фурменных очагов, до достижения оптимальных значений. Слишком крутые заплечики (например, с «бутылкообразным профилем») могут привести к слишком высоким скоростям газового по-

тока, что, в свою очередь, негативно скажется на КПД доменной печи. Слишком малый угол наклона приведет к чрезмерному уменьшению скорости газового потока. Наиболее важным вопросом проектирования заплечиков является выбор их высоты. Высота заплечиков является единственным параметром в габаритных размерах элементов профиля доменной печи, который имеет строго установленную минимальную величину – 3 м. Связано это с тем, что высота заплечиков должна обеспечить нормальную работу доменной печи в период работы на пониженных температурах (холодный ход). При возникновении холодного хода зона когезии из распара опускается в заплечики, что создает риск соприкосновения зоны когезии и коксовой насадки, что может привести к повышению давления газов и возникновению нижних подвисаний.

Основным элементом профиля является горн. Его диаметр определяет производительность доменной печи, а высота – накопление продуктов плавки. Сечение горна доменной печи с заданной производительностью должно обеспечивать пропуск необходимого объема фурменных газов, при этом в этой зоне располагается коксовая насадка, через которую стекают жидкие продукты плавки, встречаясь с газами. Поэтому площадь горна определяется допустимыми значениями уравнивания материалов подъемной силой газов, выходящих из фурменных очагов. Высота горна ограничивается температурой чугуна на выходе. Она должна быть соизмерима с объемом печи и количеством чугуна, поступающего в горн, но не должна быть слишком большой, чтобы не увеличивать расстояние между фурменными очагами и поверхностью продуктов плавки, а также для поддержания температуры в горне на достаточном уровне.

Анализ методик расчета профиля доменной печи

Изучали различные методики расчета профиля доменных печей. Существующие методики расчета можно разделить на две группы: статистические методики (А. Ледебур, А.Н. Рамм, Н.К. Леонидов) и методика расчета на основе учета процессов, проходящих в доменной печи (М.А. Павлов) [1-6].

Статистические методики расчета профиля доменной печи основаны на жестком закреплении коэффициентов в формулах по расчету габаритных размеров элементов профиля (табл. 1).

В основном в статистических методиках диаметры рассчитывались в зависимости от полезного объема доменных печей (см. табл. 1), что не лишено смысла, так как при увеличении объема доменной печи ее поперечные размеры растут. Высоты же в основном определялись исходя из общей высоты доменной печи. Недостатком статистических методов расчета профиля является невозможность адаптации профиля доменной печи к современным шихтовым и дутьевым условиям [3].

В настоящее время при проектировании профиля доменных печей за основу берут методику М.А. Пав-

лова. Основная концепция этой методики заключается в учете процессов, происходящих в доменной печи, а также шихтовых и дутьевых условий работы. Также М.А. Павлов вывел коэффициенты для оценки корректности расчета отдельных элементов профиля (табл. 2). Многие ученые и исследователи пытались уточнить методику М.А. Павлова. Б.И. Китаев указал на возможность уменьшения высоты доменных печей с учетом условий теплообмена, Н.К. Леонидов продемонстрировал, что сохранение соотношения сил, влияющих на сход шихты в больших доменных печах, равным таковому в малых печах, возможно при меньшем увеличении высоты печи. Г.Г. Орешкин предложил приблизить очертания заплечиков, распара и шахты к фактическому очертанию их в период работы печи с наилучшими показателями. В.И. Логинов предложил определять площади горизонтальных сечений горна, распара и колошника по количеству образующихся газов на 1 т чугуна и допустимой средней скорости их движения с учетом температуры, и давления газов. Г.Ю. Крячко при выборе профиля проектируемое рабочее пространство доменной печи делит на две зоны – противоточную область и горн [4, 5].

Отправной точкой расчета профиля по методике М.А. Павлова является диаметр горна. В современной интерпретации данной методики диаметр горна рассчитывается исходя из значения сечения горна, обеспечивающей заданную производительность и зависящую от расхода кокса и интенсивности горения кокса.

Сравнительный расчет профиля доменной печи полезным объемом 3800 м³

Сравнительный расчёт профиля проводился в следующие этапы:

1) расчет профиля по нескольким методикам: М.А. Павлова, А. Ледебур, В.К. Леонидова, А.Н. Рамма;

2) критический анализ полученных результатов расчета для выбора наиболее приближенных к современным условиям;

3) адаптация размеров и очертаний профиля к условиям работы современных доменных печей.

Результаты расчета профиля и сравнительный анализ на корректность представлены в табл. 3. Анализ табл. 3 показал несоответствие между полученными результатами расчетов профиля по статистическим методам и рациональными соотношениями. Это также подтверждается чертежами профилей доменных печей, рассчитанных по указанным методикам. Профиль доменной печи, разработанный по методике М.А. Павлова, оказался наиболее близким к рациональным соотношениям (рис. 2).

Рациональность расчетов по методике М.А. Павлова справедлива только для диаметров колошника, распара, горна и высоты заплечиков. Остальные размеры элементов профиля необходимо адаптировать к условиям работы современных доменных печей. Размеры и очертания профиля, удовлетворяющие современным шихтовым условиям работы доменных печей, должны учитывать следующие аспекты:

Таблица 1

Статистические методы расчета профиля доменной печи

Размер элемента профиля, м	Обозначение	Метод А. Ледебур	Метод Н.К. Леонидова	Метод А.Н. Рамма		
				первый	«нормальный»	геометрически подобный
Диаметр:						
распара	D	$0,2857H$	$0,384V_{\Pi}^{0,44}$	$0,53V_{\Pi}^{0,40}$	$0,59V_{\Pi}^{0,38}$	$0,83V_{\Pi}^{0,33}$
горна	d_{Γ}	$0,1H$	$0,342V_{\Pi}^{0,44}$	$0,32V_{\Pi}^{0,45}$	$0,32V_{\Pi}^{0,45}$	$0,9D$
колошника	d_{κ}	$0,2H$	$0,593V_{\Pi}^{0,33}$	$0,50V_{\Pi}^{0,36}$	$0,59V_{\Pi}^{0,33}$	$0,7D$
Высота:						
полная	H	$2,85V^{1/3}$			$5,56V_{\Pi}^{0,24}$	$3,35D$
полезная	H_{Π}		$6,42V_{\Pi}^{0,2}$	$6,14V_{\Pi}^{0,2}$	$0,88H$	$2,95D$
горна	h_{Γ}	$0,1H$	$0,125H$	$0,115H$	$0,10H$	$0,35D$
заплечиков	h_3	$0,21H$	$0,11H$	3,0	3,2	$0,35D$
распара	h_p	$0,04H$	$0,07H$	$0,08H$	$0,07H$	$0,20D$
шахты	h_{Π}	$0,65H$	$0,60H$	$0,69H-3,0$	$0,63H-3,2$	$1,80D$

Таблица 2

Коэффициенты для проверки корректности расчета элементов профиля

Параметры	H_0/D	D/d_r	d_k/D	h_z/D	V_{Π}/S_r	$\alpha_{\text{зап}}$	$\alpha_{\text{ш}}$
Обозначения коэффициентов		$f_{\text{гр}}$	$f_{\text{кр}}$	$f_{\text{зр}}$	$f_{\text{ш}}$		
Рациональные значения по М.А. Павлову	менее 2,3	1,095-1,13	0,65-0,70	0,27	13-15	77-80	83-85

Таблица 3

Сравнительный анализ рассчитанных элементов профиля доменной печи полезным объемом 3800 м³ по различным методикам

Параметры	V, м ³	H ₀ , мм	d _г , мм	D, мм	d _к , мм	h _к , мм	h _ш , мм	h _р , мм	h _з , мм	h _г , мм	H ₀ /D	D/d _г	d _к /D	h _з /D	V _ш /S _г	α _{зап}	α _ш
Коэффициенты												$f_{рг}$	$f_{кр}$	$f_{зр}$	$f_{ш}$		
Рациональные отношения											Менее 2,3	1,095-1,13	0,65-0,70	0,27	13-15	77-80	83-85
М. А. Павлов	3584	27919	13523	14808	9921	2000	17455	2000	4000	2604	2,12	1,095	0,67	0,27	14,78	80,9	82,0
А. Ледебур	3800	44500	7600	12700	8892		28900	1780	9340	4446	3,50	1,6716	0,70	0,74	58,92	74,3	86,2
Н.К. Леонидов	3800	33380	12860	14430	9000	3170	20030	2340	3670	4170	2,31	1,122	0,62	0,25	16,92	77,9	82,3
А.Н. Рамм	3800	28910	13060	14330	9720	3320	16950	2310	3000	3320	2,02	1,097	0,68	0,21	11,01	78,0	82,3
А.Н. Рамм – нормальный	3800	35376	13063	13526	8957	3216	22126	2814	3200	4020	2,62	1,035	0,66	0,24	16,61	85,9	84,1
А.Н. Рамм – геометрически подобный	3800	38210	11650	12950	9066	3238	23310	2590	4533	4533	2,95	1,112	0,70	0,35	21,03	81,9	85,3

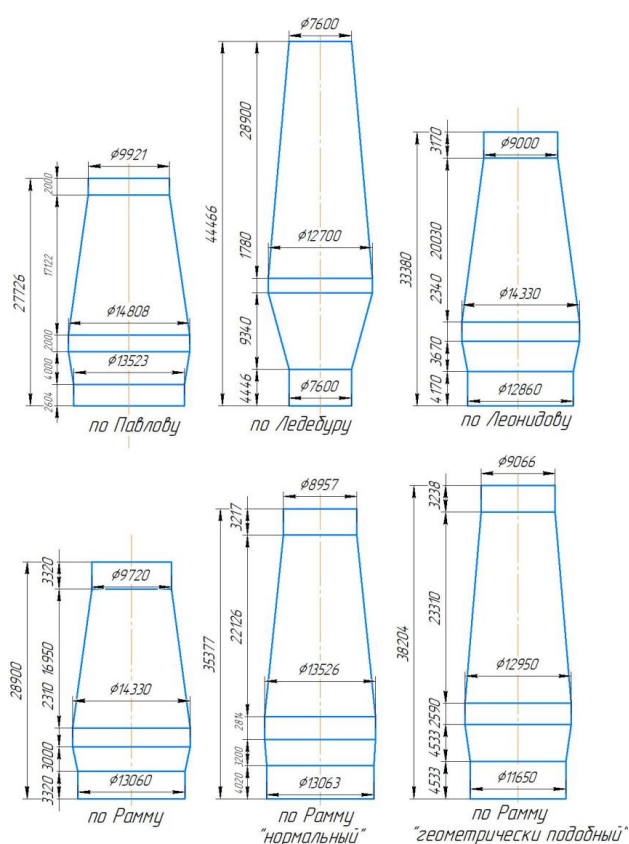


Рис. 2. Профили доменной печи полезным объемом 3800 м³, рассчитанные по различным методикам

1) Тип загрузочного устройства. Современное загрузочное устройство позволяет принять высоту колошника на минимально возможном уровне 1700 мм.

2) Периодическое использование сырых шихтовых материалов в качестве добавок негативно влияет на газодинамику верхней части шахты. Для снижения вероятностей верхних подвисаний рекомендуется проектировать шахту с переменным углом наклона.

3) Сырьевые условия современных доменных печей подразумевают использование смеси агломера-

та и окатышей. Это обстоятельство требует увеличенной высоты распара для оптимального вписывания зоны когезии. На основе анализа практических данных (профили успешно работающих доменных печей большого объема) для доменной печи полезным объемом 3800 м³ рекомендуется принимать высоту распара, равную 3,0 м.

4) Температура загружаемого в доменную печь агломерата. Использование бесконусных загрузочных устройств на доменных печах ограничивает температуру загружаемого сырья (до 200°C). В результате этого поступление тепла с шихтовыми материалами в верхнюю часть доменной печи и доля косвенного восстановления снижаются. Это создает необходимость вести доменный процесс с увеличенным расходом кокса для компенсации потерь тепла на прямое восстановление и недостаточного прогрева шихты при приближении к зоне высоких температур. На этапе проектирования можно частично устранить данные негативные последствия, увеличив высоту шахты. Удлинение шахты позволит увеличить время нахождения шихтовых материалов в зоне косвенного восстановления и обеспечить более качественный прогрев шихтовых материалов при подходе к зоне высоких температур. Рекомендуется увеличение высоты шахты до 18,0 м.

5) Для обеспечения эффективных процессов накопления и выпуска жидких продуктов плавки рекомендуется принять высоту горна 4,5 м.

Используя методику расчета М.А. Павлова и рациональные соотношения размеров элементов профиля, был спроектирован профиль доменной печи объемом 3800 м³, соответствующий современным условиям работы. Результаты расчета представлены в табл. 4 в сравнении с методикой М.А. Павлова. На рис. 3 представлен чертеж спроектированного профиля доменной печи объемом 3800 м³, соответствующего современным условиям работы доменных печей в сравнении с профилем, рассчитанным по методике М.А. Павлова.

Результаты расчета профиля доменной печи объемом 3800 м^3 для условий ПАО «ММК»
в сравнении с методикой М.А. Павлова

Параметры	$V, \text{м}^3$	$H_0, \text{мм}$	$d_t, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$d_k, \text{мм}$	$h_k, \text{мм}$	$h_{ш}, \text{мм}$	$h_p, \text{мм}$	$h_3, \text{мм}$	$h_f, \text{мм}$	H_0/D	D/d_t	d_k/D	h_3/D	$V_{ш}/S_t$	$\alpha_{зап}$	$\alpha_{ш}$
М.А. Павлов	3584	27919	13523	14808	9921	2000	17455	2000	4000	2604	2,12	1,095	0,67	0,27	14,78	80,9	82,0
Предлагаемый профиль	3800	31069	13088	14331	9602	1700	18000	3000	3869	4500	2,17	1,095	0,67	0,27	15,0	80,9	82,5

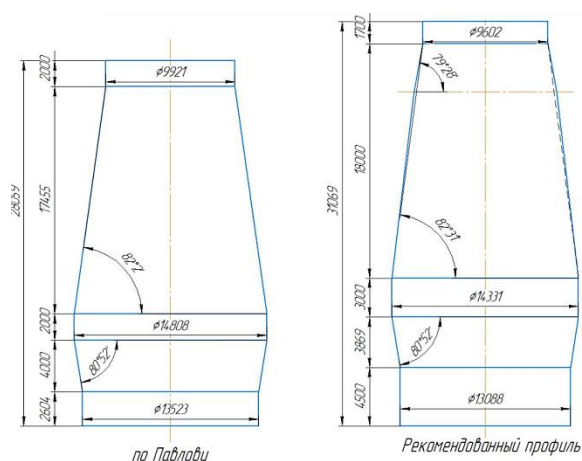


Рис. 3. Сравнение расчетных профилей доменной печи полезным объемом 3800 м^3

Заключение

Рассмотрены влияние размеров и очертаний элементов профиля доменной печи на ее работу. Проведен сравнительный анализ методик расчета профиля.

Приведены результаты расчета профиля для доменной печи объемом 3800 м^3 с использованием различных методик и проведен сравнительный анализ полученных результатов. Выявлен наиболее рациональный профиль. Проведена адаптация профиля к современным шихтовым условиям работы доменных печей. Целесообразно уменьшать высоту

колошника до 1,7 м, увеличивать высоту шахты до 18 м, распара до 3 м, горна до 4,5 м

Список источников

1. Дружков В.Г., Прохоров И.Е., Макарова И.В. Основы проектирования доменных печей: учебное пособие для вузов. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2022. URL: <https://host.megaprolib.net/MP0109/Download/MObject/20292>
2. Проектирование доменного цеха: учеб. пособие / В.Г. Дружков, А.Д. Коноплев, И.Е. Прохоров, И.В. Макарова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 323 с.
3. Макарова И.В., Макаров К.Р., Аксенов Т.А. К вопросу расчета профиля доменных печей // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2024. №23. С. 28-34.
4. Братковский Е.В., Шаповалов А.Н. Методическое пособие для выполнения курсового проекта по дисциплине «Проектирование сталеплавильных и доменных цехов». Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2013. 83 с.
5. Устройство и проектирование доменных печей: учеб. пособие / Л.И. Каплун, А.В. Малыгин, О.П. Онорин, А.В. Пархачев. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 219 с.
6. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса: учебное пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 257 с.

Сведения об авторах

Макарова Ирина Владимировна – доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: m.irina1976@mail.ru

Щелоков Николай Сергеевич – студент магистратуры кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: mr.ekman@mail.ru

Макаров Кирилл Романович – студент магистратуры кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Зарицкий Борис Борисович – старший преподаватель кафедры «Механика», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

Ярославцев Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: a.yaroslavtsev@magtu.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

COMPARATIVE ANALYSIS OF BLAST FURNACE PROFILE CALCULATION METHODS: SEARCH FOR OPTIMAL SOLUTIONS

Makarova Irina V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.irina1976@mail.ru

Shchelokov Nikolai S. – Master's student at the Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mr.ekman@mail.ru

Makarov Kirill R. – Master's student at the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zaritskii Boris B. – Senior Lecturer of department «Mechanics», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaritskii.boris.borisovich@yandex.ru.

Jaroslavtsev Alexey V. – PhD. (Eng.), Associate Professor of the Department of Machines and Technologies of Pressure Processing and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.yaroslavtsev@magtu.r

Abstract. The study examines the influence of the dimensions and contour of the blast furnace profile on the processes occurring within it. A comparative analysis of various methodologies for calculating the blast furnace profile was conducted. It was demonstrated that in statistical methods, the diameters were primarily calculated based on the useful volume of the blast furnaces. A significant drawback of these statistical methods is their inability to adapt to modern charging and blowing conditions of blast furnace operation.

Currently, the methodology developed by M.A. Pavlov serves as the foundation for designing blast furnace profiles. Its core concept lies in considering the processes taking place in the blast furnace, as well as the charging and blowing conditions. This approach allows for a more accurate and adaptable design, tailored to the specific operational requirements of modern blast furnaces. The study highlights the importance of integrating process dynamics and operational conditions into the design process to enhance efficiency and performance. By focusing on these factors, the methodology ensures that the blast furnace profile is optimized for contemporary industrial demands, leading to improved productivity and sustainability in metallurgical processes.

Keywords: blast furnace, profile, throat, shaft, steam, shoulders, hearth, calculation method

Ссылка на статью:

Сравнительный анализ методик расчета профиля доменной печи: поиск оптимальных решений / Макарова И.В., Щелоков Н.С., Макаров К.Р., Зарицкий Б.Б., Ярославцев А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №1(52). С. 11-16.
Makarova I.V., Shchelokov N.S., Makarov K.R., Zaritskii B.B., Jaroslavtsev A.V. Comparative analysis of blast furnace profile calculation methods: search for optimal solutions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 52, no. 1, pp. 11–16.