

ментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов». – Екатеринбург: ООО «ИПЦ». – 2012. – С. 236–240.

11. Совершенствование технологии первичной переработки металлургических шлаков, склонных к силикатному распаду / В.А. Федосеенко [и др.] // Сталь. – 2001. – № 12. – С. 77–80.

12. Охлаждение и кристаллизация шлакового расплава в межшаровом пространстве / А.Г. Шакуров [и др.] // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 19–22.

13. Предпосылки и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов / К.Л. Косырев [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013, июль. – С. 4–10.

14. Переработка шлаков ЭСПЦ в опытной установке барабанного типа с шаровой насадкой / Ю.В. Сорокин [и др.] // Сталь. – 2012. – № 3. – С. 70–73.

УДК 621.745

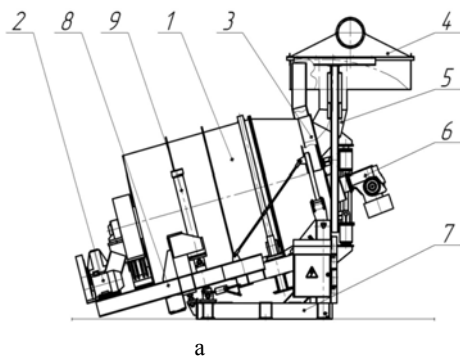
С.Л.РОВИН, канд. техн. наук (УП «Технолит»)

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ*

Введение. Ротационные наклоняющиеся печи (РНП) – новый тип топливных печей. Появившись в 90-х годах прошлого столетия, эти печи, благодаря существенным технологическим преимуществам, нашли широкое применение в процессах термообработки и плавки дисперсных материалов (рисунок 1). Сегодня во вторичной металлургии алюминиевых, медных, свинцовых и других цветных сплавов РНП составляют от 30 до 50 % всего парка плавильных агрегатов.

Термический к.п.д. (т.к.п.д.) РНП при нагреве дисперсных материалов, например, стружки, в 2–3 раза превышает т.к.п.д. традиционных короткобаранных печей. Удельное количество энергии (плотность теплового потока), подводимое к шихте во время нагрева и расплавления, в РНП существенно выше, чем в индукционных

и дуговых печах. Ротационные печи позволяют вести методический режим обработки, как по температуре, так и по составу атмосферы печи, что позволяет не только переплавлять шихтовые материалы, но и восстанавливать металлы из оксидов, сульфатов, сульфидов и других соединений. Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. Печи позволяют в случае необходимости провести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Интенсивность обработки дисперсного материала в таких печах значительно выше, чем в печах других типов. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродосодержащие материалы, в том числе, отходы вплоть до лигнина. Достоинством таких печей являются относительно низкие инвестиционные затраты, компактность, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов.



а – общий вид РНП емкостью 1,5 т; б – опытно-экспериментальная РНП емкостью 0,5 т
 1 – корпус печи; 2 – привод вращения; 3 – крышка поворотная; 4 – зонт;
 5 – дымоход; 6 – горелка; 7 – рама опорная; 8 – рама поворотная;
 9 – привод наклона печи

Рисунок 1 – Ротационная наклоняющаяся печь

РНП наилучшим образом отвечают задаче переработки дисперсных влажных, загрязненных маслами и случайными неметаллическими примесями металлоотходов.

Результаты исследований, включая компьютерное имитационное моделирование, а также имеющийся опыт проектирования, внедрения и эксплуатации РНП различного назначения и мощности позволили разработать основные принципы и рекомендации по конструированию и эксплуатации печей такого типа. Рассмотрим основные процессы, происходящие в РНП.

Движение материала. Движение дисперсного материала в ротационных печах определяется силами межчастичных связей (когезии), внутреннего трения в слое, силами трения на границе «материал – футеровка», силами инерции (центробежными силами) и силой тяжести. Кроме того на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы вращающегося скоростного потока газов.

Очевидно, что при увеличении скорости вращения интенсивность перемешивания увеличивается. Чем больше сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушается) слой. В целом для понимания механики движения шихтовых материалов в ротационных печах может быть использована известная математическая модель, описывающая поведение материала в шаровой мельнице.

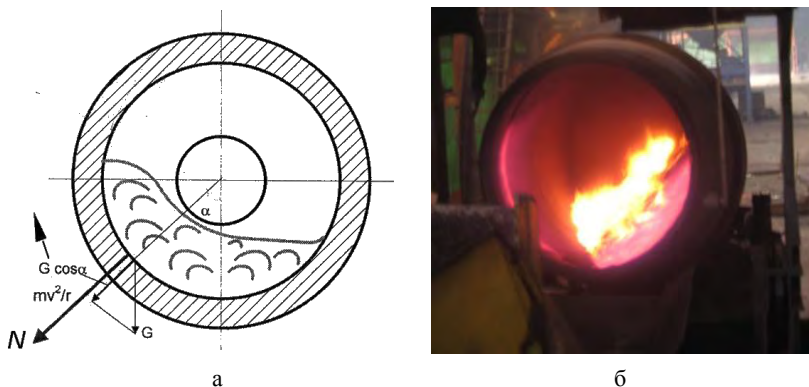
На частички (m), расположенные в непосредственной близости от поверхности барабана (рисунок 2), действует радиальная сила N , возникающая от действия центробежной силы и радиального вектора веса [2]:

$$N = \frac{mv^2}{r} \pm mg \cos \alpha .$$

Во время вращения барабана сила N вызывает трение между частицами материала и поверхностью барабана, в результате чего происходит «прилипание» частиц к поверхности барабана ($F_{\text{тр}} = NK_{\text{тр}}$), их подъем и ускорение.

С увеличением угла α радиальная компонента веса уменьшается и меняет знак после того, как частицы перейдут через горизонтальную ось ($\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$). В зависимости от скорости, раньше или позже, частица теряет контакт с поверхностью барабана и по

баллистической траектории падает вниз. Частицы, падающие вниз, создают каскад и покрывают верхний слой материала, таким образом происходит перемешивание материала в печи.



а – схема распределения сил, действующих на материал в ротационных печах;
б – подогрев стружки в РНП (завод «Центролит», г. Гомель)

Рисунок 2 – Движение материала в ротационной печи

При критической скорости (V_k) центробежная сила равна весу частицы. При такой скорости материал как бы прилипает к внутренней поверхности барабана:

$$\frac{mv^2}{r} = mg \quad (\cos \alpha = 1).$$

В результате получаем:

$$V_k = \sqrt{g \cdot r};$$

$$V_k = n \cdot \pi \cdot D.$$

Приведенное равенство предлагает очень удобный способ для определения режимов, обеспечивающих максимально эффективное

перемешивание материала в ротационных печах. Поведение слоя материала сильно отличается от отдельно взятой частицы, фактически критическая скорость зависит от степени наполнения печи и состава материала. В зависимости от степени наполнения наиболее эффективные режимы соответствуют диапазону угловых скоростей при относительно плотной шихте – $n = (6,5-15)D^{-0,5}$ [1], при «легком» скрапе – $n = (10-27)D^{-0,5}$ [2].

В РНП к названным выше силам добавляется осевая сила. Это происходит благодаря углу наклона ($12-15^\circ$) оси печи к горизонтальной поверхности, что заставляет материал продвигаться по спирали к днищу печи и затем снова вперед к горловине (рисунок 2). Дополнительные движения усиливают процессы разрушения и смешивания внутри слоя материала.

По мере того, как температура повышается, шихтовые материалы теряют влагу, масла, СОЖ и другие органические загрязнения, при этом межчастичные связи и внутреннее трение снижаются (это относится, в первую очередь, к окалине, стружке и другим дисперсным металлоотходам), в слое начинают преобладать сдвиговые деформации. Перемешивание материала в форме каскада может быть достигнуто в этом случае только при увеличении скорости вращения барабана. Однако в плавильных ротационных печах (и в короткобарабанных, и в РНП) скорости вращения, как правило, не превышают 5–6 об./мин, а после расплавления шихты обычно снижаются до 0,5–1,0 об./мин. Максимальный угол подъема материала относительно вертикальной оси ($\alpha_{кр}$) при этом практически полностью определяется коэффициентом внешнего трения: $\text{tg } \alpha_{кр} = K_{тр}$.

Нагрев материала в ротационных печах. Анализ технологических и конструктивных особенностей ротационных печей позволяет утверждать, что эти печи наилучшим образом адаптированы для переработки полидисперсного навалного материала, состоящего в основном из небольших отдельных частиц. В этом случае процесс теплообмена достаточно сложен. Несмотря на развитую поверхность материала, площадь облучаемой поверхности практически не изменяется. Уровень же передачи теплоты теплопроводностью в слое низкий из-за большого количества границ раздела и низкой плотности материала. Для того чтобы достичь необходимой скорости теплообмена, навалный материал должен перемешиваться и

продуваться горячими газами – в этом случае теплопередача происходит за счет конвекции. Это обеспечивается в РНП, особенно в верхней части слоя, за счет высоких скоростей и интенсивной турбулентности потока горячих газов.

Анализ расчетных данных и практических результатов, полученных при переплавке чугуновой стружки в сравнении с ее плавкой в неподвижном слое показывает, что динамический режим плавки обеспечивает расплавление стружки за 30–40 мин, а при тех же условиях, но без перемешивания (вращения печи), верхние слои плавятся только через 50–60 мин, а на подине через ~ 70–75 мин (что и определяет общую длительность плавки). При этом расход топлива тоже почти в 2 раза превышает его расход в РНП.

В общем случае теплота во вращающихся печах, в том числе РНП, передается шихтовому материалу следующими способами: излучением от факела и стен печи, теплопроводностью от стен печи при соприкосновении со слоем и внутри слоя, конвекцией от факела и потока горячих газов.

Теплообмен излучением от стен печи можно рассчитать, приняв температуру футеровки постоянной, что не противоречит реальным условиям из-за постоянного обновления поверхности при вращении печи. Тогда количество теплоты, переданной от стен слою материала, будет равно [4]:

$$Q = k \cdot \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{п}} \cdot \tau,$$

где k – коэффициент, учитывающий высокую запыленность газового потока в печи; ε – степень черноты футеровки; C_0 – приведенный коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_c , T_m – температура футеровки и нагреваемого материала; $F_{\text{п}}$ – площадь излучающей поверхности с учетом углового коэффициента; τ – время нагрева материала.

Излучение от потока горячих газов происходит, в первую очередь, благодаря содержанию в них трехатомных компонентов – водяного пара и диоксида углерода. Азот не выделяет энергии, но его наличие очень важно для передачи теплоты путем конвекции.

В РНП газы совершают вращательное и петлеобразное движение. Движение газов в нижней и верхней части происходит навстречу друг другу, при этом потоки активно перемешиваются. В нижней зоне, прилегающей к слою материала, наблюдаются максимальные температуры, скорости газов и концентрации CO и H_2 , в верхней: температура ниже (остаточная температура), соответственно ниже рабочие скорости при равном расходе, а в газах содержатся максимальные количества CO_2 и H_2O . Уменьшение в этом потоке содержания трехатомных газов и температуры снижает количество излучаемой теплоты.

В зависимости от соотношения температур потока газов и футеровки в верхней части печи теплообмен периодически может менять направление. Охлаждающее действие потока в верхней зоне наблюдается, например, в завершающей стадии процесса восстановительной плавки при выдержке, когда футеровка при кислородном дутье разогревается до температур $1700\text{--}1800\text{ }^\circ\text{C}$, а поток после отключения подачи кислорода имеет температуру $1500\text{ }^\circ\text{C}$, на выходе из печи $\sim 1000\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Существенно меняются и поля скоростей потока, причем не только из-за петлеобразного неизоэнтальпического характера течения газов, но и из-за сложного пространственного перераспределения. На границах, разделяющих поток горячих газов и материал, активно происходит конвективный перенос теплоты и массообмен между газами, образующимися в печи, и подаваемыми в печь продуктами горения.

Передача теплоты конвекцией нагреваемому материалу – наиболее значимый процесс при нагреве динамического слоя дисперсного материала.

Проточность мелкозернистых материалов с размером частиц $d = 0,2\text{--}5,0$ мм (где d – приведенный диаметр) соответствует критерию проточности $K_{\text{п}}$ в пределах $10^5\text{--}10^7$ и соответственно коэффициенту объемной концентрации $\beta = \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{сл}}} \approx 0,35\text{--}0,65$. Эти параметры

относятся к подвижному верхнему слою материала толщиной (по практическим данным) ~ 50 мм. В общем случае интенсивность межфазного переноса для продуваемого слоя связана с размером частиц соотношением $\alpha_V = \alpha(1 + 0,2\text{Bi})^{-1}$, где α – внешний коэффи-

коэффициент теплообмена, $Bi = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерий Био, λ – коэффициент теплопроводности материала [3].

При уменьшении скорости потока газов, омывающего частицы в слое, и размеров частиц турбулентность потока уменьшается ($Re \rightarrow 0$), и так как критерий Нуссельта $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = f(Re)$, то соответственно снижается и интенсивность нагрева (α). При этом, однако, сохраняется высокая степень неоднородности потока, поэтому даже в глубине динамического слоя $Nu \gg Nu = f(Re)$. Сохраняется и концентрационный напор на реакционной поверхности частиц.

Нагрев верхнего динамического слоя материала в ротационной печи может быть рассчитан по модифицированному уравнению нестационарной теплопроводности, где вместо коэффициента теплопроводности слоя $\lambda_{сл}$ используется бинот (αd), рассчитанный для усредненных значений процесса передачи теплоты отдельной частицы продуваемого слоя (для одномерной схемы):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{(\alpha d)}{c_p} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

где x – высота (толщина) слоя.

Параболический закон ($n \approx 2,5$) распределения температур в слое сохраняется, так как плотность слоя увеличивается с глубиной и, соответственно, уменьшается интенсивность потока газов. Для верхней части слоя $\alpha_v \approx 10^3$ кВт/(м³·К), для нижней неподвижной части $\alpha_n \approx 0,3$ кВт/(м³·К) при тех же диаметрах $d \leq 5$ мм.

Необходимо отметить, что максимальная интенсивность нагрева дисперсного материала достигается во взвешенном состоянии: для тех же условий время нагрева частицы, например, чешуйки окалины или песчинки, составит $\sim 0,004$ – $0,1$ с. Но на практике такой режим может быть использован только для монодисперсного материала.

Во вращающихся печах, где используется механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен зависит от соотношения толщины внешней динамической и неподвижной внутренней

части слоя, границей между которыми является скорость фильтрации газа V_{ϕ} . Толщину динамического слоя можно определить по сопротивлению, которое не должно быть больше скоростного потока газов в печи. Скорость газов в РНП обычно $V_r \leq 1-20$ м/с. Отсюда:

$$\Delta p_c \leq \frac{1369 \frac{1}{2} p_2}{273 - t}.$$

Эмпирические уравнения, определяющие степень интенсификации теплообмена при движении материала, полученные для соотношений характерного размера слоя (h) и частиц (d) более 40 крат и порозности не менее $\varepsilon \geq 0,4$:

$$Nu_n = \frac{\alpha_n d}{\lambda} = 6,9 Re^{0,47};$$

$$\alpha = \alpha_n \left[1 + 4 \left(\frac{V_m}{V_{\phi}} \right)^{0,36} \right],$$

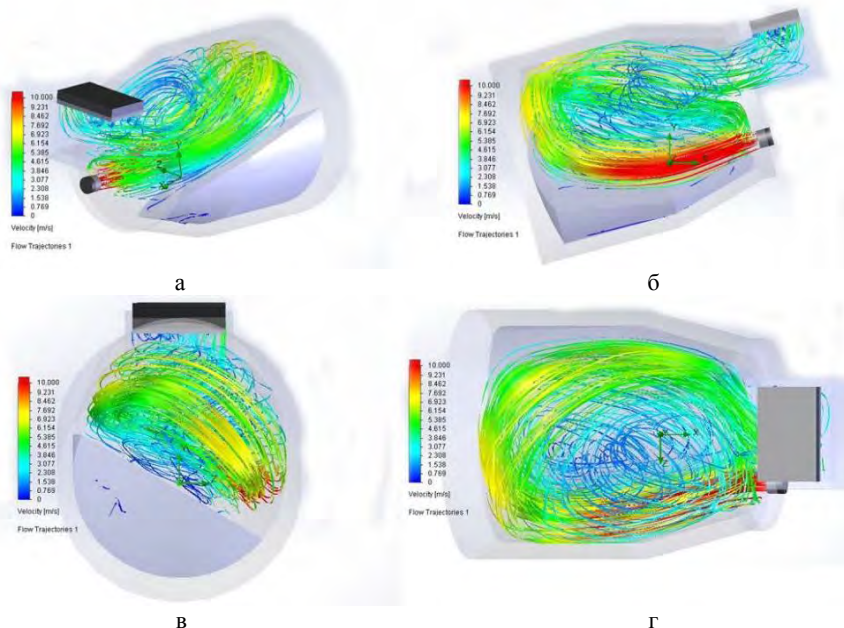
где величины с индексом «н» относятся к неподвижному слою; V_{ϕ} , V_m – скорости фильтрации и движения материала.

Петлеобразное движение газов в РНП приводит к осаждению частиц в торцевой зоне печи и в циркуляционной зоне перед крышкой, где за счет подсасывающего действия факела частицы увлекаются в поток. Благодаря сложному петлеобразному движению газов в РНП, в отличие от прямоточных барабанных печей, линейные скорости в потоке могут достигать 20–25 м/с. Соответственно увеличивается и скорость фильтрации V_{ϕ} .

Течение газов в ротационных печах отличается большой сложностью и несимметричностью, сочетанием прямых и обратных токов, наличием циркуляционных зон, изменением параметров по всем трем координатам.

Некоторое представление о характере движения газов в РНП дают приведенные на рисунке 3 картины газовых потоков, получен-

ные в результате компьютерного моделирования с помощью ППП CosmosFlowWorks и ANSISCFX.



а – аксонометрия; б – вертикальный разрез по оси горелки;
в – вид сзади; г – вид сверху

Рисунок 3 – Траектория движение газов в ротационной наклоняющейся печи

Третья составляющая теплообмена в РНП – это передача теплоты между внутренней поверхностью барабана печи и покрывающим ее материалом теплопроводностью:

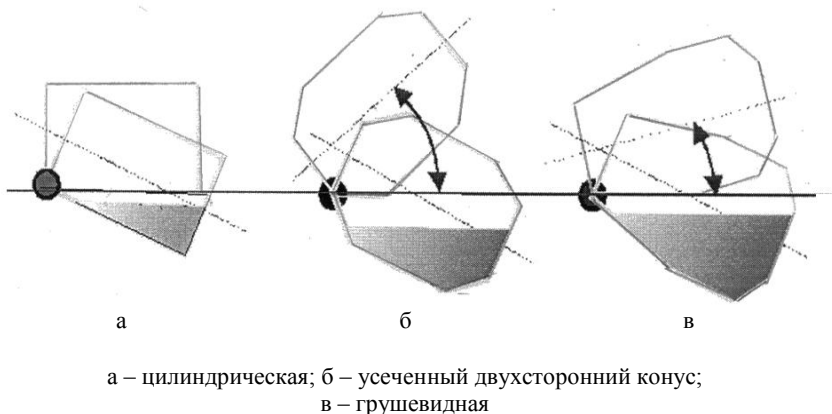
$$q_w = k_w(\upsilon_w - \upsilon_b),$$

где q_w – это теплота, переданная от поверхности футеровки печи на 1 м^2 фактической площади; k_w – коэффициент теплопередачи для системы «поверхность–материал»; υ_w и υ_b температуры поверхности футеровки и шихты, соответственно.

Благодаря вращению барабана часть его поверхности стены всегда покрыта материалом. Так как температура внутренней поверхности барабана выше, чем температура расплава, некоторая часть теплоты передается от нее к материалу. Количество теплоты, передаваемое внутрь слоя теплопроводностью относительно теплопередачи излучением и конвекцией, является малым и в общем балансе может не учитываться.

Требования к конструкции. Изначально концепция ротационной наклоняющейся печи была основана на цилиндрической форме корпуса печи [2]. При использовании печей малой мощности и объема такая конструкция достаточно удобна, поскольку она предполагает максимальный размер загрузочного отверстия (рисунок 4). По мере увеличения объема печи использование этой формы становится нерациональным. Дальнейшее увеличение размеров загрузочного отверстия уже не приводит к повышению темпа загрузки и разгрузки печи, напротив, в результате этого энергопотери становятся неприемлемо высокими.

Увеличение рабочего объема за счет увеличения длины корпуса также невозможно. Технические возможности горелок ограничены и при слишком длинном корпусе его задняя стенка (днище печи) не может быть достаточно эффективно прогрета.



а – цилиндрическая; б – усеченный двухсторонний конус;
в – грушевидная

Рисунок 4 – Варианты конструкции корпуса РНП

Оптимальное соотношение «длина/диаметр» находится в диапазоне 1,5–1,7. Одно из решений – выполнение передней и задней частей корпуса в виде усеченных конусов или полусфер (рисунок 4, б). Такая форма повышает жесткость корпуса, удобна при загрузке шихты и рациональна с точки зрения экономии энергии, но требует использования большого угла опрокидывания, что может привести к опасной ситуации, когда, например, при выгрузке шлака его соскальзывание будет неконтролируемым.

Одним из наиболее оптимальных вариантов является изготовление корпуса, имеющего со стороны загрузки вытянутый конус в форме бессемеровского конвертера. При такой форме угол наклона корпуса при сливе металла находится в приемлемых пределах, основное количество расплава расположено в задней части корпуса печи, что увеличивает полезный объем.

Во время вращения печи возникают несбалансированные нагрузки, вызываемые движением материала в печи, возможным спеканием и обрушением шихты и образованием настывлей на поверхности футеровки. Поэтому надежная работа печи во многом зависит от конструкции опорных и фиксирующих роликов (рисунок 5), а также схемы опорной части.

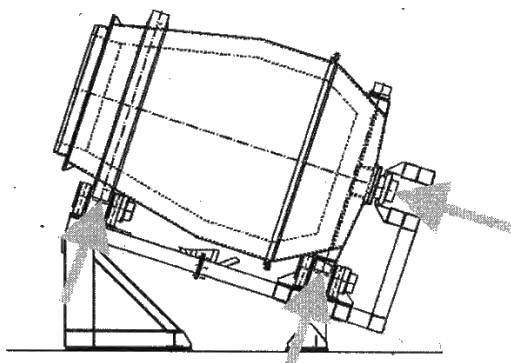


Рисунок 5 – Опорные реакции РНП

При расчете парных опорных роликов и заднего подшипника необходимо учитывать радиальные и осевые нагрузки. Вес шихты, вес барабана и его футеровки, а также динамические несбалансирован-

ные нагрузки, определяют радиальные нагрузки на подшипники опорных роликов.

На днище корпуса система центрального подшипника воспринимает осевые нагрузки, вызванные осевыми биениями и проекцией веса печи на ось вращения в рабочем положении и в положении печи при сливе расплава. Опора сконструирована в виде крещеткопфного подшипника, который свободно передвигается в направлении осей z и y , но неподвижен в направлении оси x , т.е. в осевом направлении барабана печи. Подшипник в определенной мере позволяет скомпенсировать несоосность осей печи.

Изгиб и вибрация корпуса печи должны быть сведены к минимуму, особенно при передаче усилий привода вращения на торец печи (см. рисунок 1).

Подвижная рама, благодаря которой осуществляется наклон печи, устанавливается на неподвижной несущей раме, опирающейся на бетонный фундамент. Опоры гидравлических цилиндров также крепятся к несущей раме.

Привод вращения должен обеспечивать плавное регулирование скорости вращения корпуса. Наиболее надежным вариантом является установка электрического двигателя с инвертором, редуктора с постоянным передаточным числом и цепной передачей на корпус печи.

Крышка печи выполняется на поворотной стойке, связанной с неподвижной несущей рамой, и оснащается гидроприводом для поворота на $120\text{--}180^\circ$. В верхней половине крышки располагается дымоход и зонт системы аспирации, которые должны обеспечивать полное улавливание вредных веществ, выделяющихся при плавке, загрузке и сливе расплава. Укрытие выполняется стационарным, зонт может быть стационарным и поворотным.

Опыт конструирования позволяет сформулировать основные требования к геометрическим параметрам РНП для рециклинга дисперсных металлоотходов (рисунок 6):

- соотношение диаметра (D) и длины (глубины L) рабочего пространства печи: $D/L = 0,55\text{--}0,65$;
- соотношение длины цилиндрической ($l_{\text{ц}}$) и конической части ($l_{\text{к}}$): в пределах $l_{\text{ц}}/l_{\text{к}} = 2\text{--}2,5$;

- соотношение диаметра горловины (d) к диаметру цилиндрической части (D) – $d/D = 0,66–0,77$ (меньшие значения для печей больших объемов от 5 м^3 и выше).

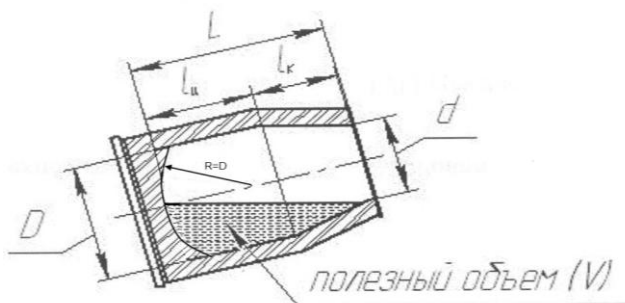


Рисунок 6 – Геометрия рабочего объема ротационной наклоняющейся печи

Помимо указанных выше рекомендаций по соотношению основных геометрических размеров рабочего пространства печи, создание эффективной и надежной РНП предполагает соблюдение следующих требований:

- в рабочем положении ось печи должна поворачиваться относительно горизонтальной оси на угол $-(12–18)^\circ$, в положении слива расплава и скачивания шлака печь должна быть наклонена под углом $+(25–35)^\circ$;

- ось горелочного устройства должна находиться под углом $(7–15)^\circ$ к горизонту – поверхности расплава (угол атаки);

- горелка должна располагаться в нижней четверти крышки печи, противоположной направлению вращения корпуса печи.

- задняя стенка печи должна иметь форму сферы (выполняется по шаблону) с радиусом равным диаметру цилиндрической части печи (D).

При правильной (оптимальной) конструкции печи ее полезный объем (V) должен составлять $\sim 28–32\%$ от общего объема рабочего пространства печи (V_p).

РНП, предназначенные для переработки оксидных металлоотходов, должны быть оснащены газогорелочными устройствами с регулируемым соотношением «газ–воздух» от $\alpha = 1,05–1,15$ при разо-

греве печи и шихтовых материалов до $\alpha = 0,6-0,7$ при проведении восстановительных процессов. Для переработки железосодержащих отходов печь должна быть оборудована системой обогащения дутья кислородом (до 27–30 % O_2 в дутье).

Расчет привода печи. При вращении нормально работающей ротационной печи мощность привода вращения расходуется в первую очередь на полезную работу: подъем материала на определенную высоту, выше которой слой разрушается, и на преодоление сил трения при перемешивании материала, а также «вредных» сопротивлений. К последним относятся: трение скольжения между поверхностями цапф опорных роликов и вкладышей подшипников, трение качения бандажей по опорным роликам, трение в приводном механизме и трение торцов корпуса печи о поверхности деталей уплотнительных устройств (для РНП – трение торца печи о крышку).

Обрабатываемый материал (шихта) в печи располагается несимметрично относительно вертикали, проходящей через центр сечения печи, поэтому он вызывает постоянно действующий и направленный в сторону, противоположную вращению печи, момент силы G_u веса материала (рисунок 7) [7]. Плечом этой силы является расстояние от центра тяжести материала до вертикали, проходящей через центр сечения печи. Следовательно, мощность, необходимая для подъема материала, равна:

$$N_1 = \frac{1000G_M v_0}{102}, \text{ кВт}$$

или

$$N_1 = \frac{1000F_M L \gamma_M v_0}{102}, \text{ кВт},$$

где F_M – площадь сечения материала (кругового сегмента), m^2 ; L – длина корпуса или его части одного диаметра, м; γ_M – объемный вес материала, t/m^3 ; v_0 – окружная скорость центра тяжести площади сечения материала, м/с.

При нагреве материала его вес уменьшается за счет потери влаги, органических примесей, восстановления оксидов и т.п. Как правило, снижается внешнее и внутреннее трение (угол естественного

откоса θ) и, соответственно, центр тяжести слоя стремится к вертикальной оси, а момент веса – к нулю. Для расчета мощности привода целесообразно использовать начальные характеристики загружаемых в печь материалов:

- коэффициент заполнения материалом (k_3), который при наклоне РНП к горизонту, равном 12° , составляет 0,28; при наклоне $15^\circ - k_3 = 0,32$;

- средний объемный вес материала γ_m составляет для чугунной стружки $\sim 1,6 \text{ т/м}^3$, для окалины $\sim 2,0 \text{ т/м}^3$;

- угол естественного откоса в исходном состоянии для окалины и чугунной стружки $\sim 40\text{--}45^\circ$.

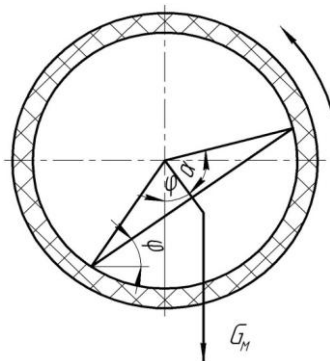


Рисунок 7 – Схема расположения материала в печи

Так как площадь сечения материала в печи по форме близка к круговому сегменту, окружная скорость его центра тяжести при вращении печи может быть представлена выражением [7]:

$$v_0 = \frac{\pi l}{30} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{CB}^3 \sin^3 \alpha}{k_3 \cdot \pi \cdot R_{CB}^2} \cdot \sin \varphi, \text{ м/с.}$$

Для чугунной стружки и окалины угол α , в зависимости от исходного содержания влаги, масел и СОЖ может составлять от 50 до 60° .

Трение качения бандажа по роликам незначительно по сравнению с трением скольжения цапф роликов о вкладыши подшипников, поэтому нет необходимости его вычислять отдельно, а целесообразнее учитывать повышением коэффициента трения скольжения. Тогда мощность, необходимая на преодоление трения в подшипниках роликов и бандажей о ролики, может быть найдена по формуле:

$$N_2 = \frac{P_{\text{тр}} v_{\text{ц}}}{102}, \text{ кВт.}$$

Сила трения и окружная скорость цапф соответственно равны:

$$P_{\text{тр}} = \frac{1000f \cdot G}{\cos 30^\circ} = 1160f \cdot G$$

и

$$v_{\text{ц}} = \frac{\pi \cdot r_{\text{ц}} \cdot n}{30} \cdot \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{р}}},$$

где f – коэффициент скольжения между цапфами роликов и вкладышами подшипников; $r_{\text{ц}}$ – радиус цапф роликов, м; n – число оборотов печи в минуту; $D_{\text{б}}$ – диаметр бандажей, м; $D_{\text{р}}$ – диаметр опорных роликов, м; G – общий вес вращающейся части печи, т.

Определив окружные скорости цапф, центра тяжести материала и силы трения, и подставляя полученные значения в формулу, вычисляется требуемая мощность привода вращения печи.

Расход мощности на преодоление трения в приводном механизме и уплотнительных устройствах учитывается в КПД установки. Величина его зависит от конструкции приводного механизма, правильности его монтажа и эксплуатации, и в среднем равна 0,9 для механизма закрытого типа, 0,85 – для смешанного и 0,8 – для открытого.

При определении необходимой мощности для вращения печи в расчетное уравнение подставляют нормальное число оборотов. Однако в момент пуска печи необходима мощность выше нормальной на преодоление силы инерции вращающейся части печи. Учитывая

это, мощность электродвигателя печи следует выбирать на 20–25 % выше той, которая определяется по приведенной выше формуле.

Наблюдения за работой вращающихся печей показывают, что мощность, потребляемая ими (или нагрузка на привод), с увеличением срока их эксплуатации значительно возрастает. Поэтому не будет ошибкой принять коэффициент запаса мощности привода на уровне 50–75 %.

Ротационные наклоняющиеся печи в зависимости от габаритов, полезной емкости рабочего пространства условно можно разделить на три группы:

- печи с полезной емкостью до $1,5 \text{ м}^3$;
- печи с полезной емкостью от $1,5$ до $5,0 \text{ м}^3$;
- печи с полезной емкостью свыше $5,0 \text{ м}^3$

Печи, относящиеся к различным группам, имеют одинаковую конфигурацию рабочего пространства и при его расчете для печей, относящихся к разным группам, могут использоваться одни и те же соотношения, указанные выше. Однако приводы печей, относящихся к разным группам, имеют конструктивные отличия и особенности, что связано с требованиями надежности и долговечности работы агрегатов.

Привод вращения малых печей с полезной емкостью до $1,5 \text{ м}^3$, как правило, выполняется с помощью цепной передачи через звездочку, установленную на хвостовик печи (рисунок 1). Привод вращения печей с полезной емкостью $1,5$ – $5,0 \text{ м}^3$ целесообразно выполнять с помощью открытой цевочной передачи (рисунок 8). Привод вращения тяжелых РНП с полезной емкостью более 5 м^3 , как правило, тоже реализуется с помощью цевочной передачи, но оснащается двумя синхронно работающими моторредукторами (рисунок 9).

Синхронизация работы приводов обеспечивается зацеплением с корпусом печи. Смещение приводов к центру масс и опорному кольцу позволяет существенно снизить биения во время вращения. Применение двух приводов, симметрично расположенных относительно оси основания, уменьшает перекося при вращении печи, снижает износ втулок (пальцев) и приводной звездочки, позволяет обеспечить более равномерное вращение корпуса печи и увеличивает срок службы агрегата.

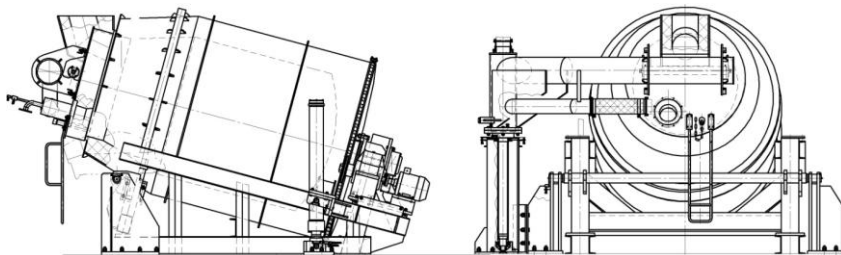


Рисунок 8 – РНП емкостью 3,5 м³, оснащенная открытой цевочной передачей

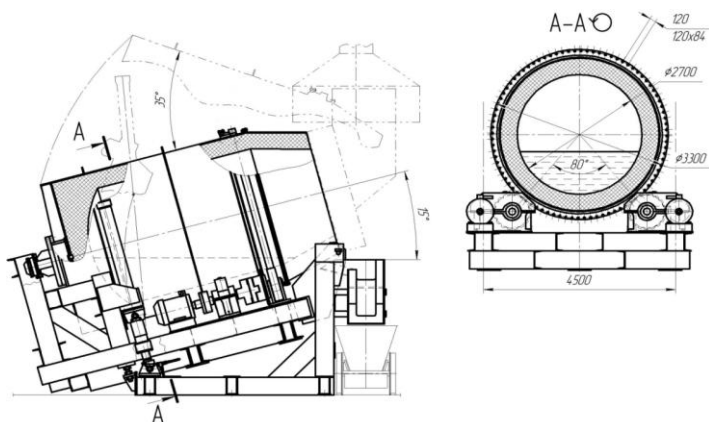


Рисунок 9 – РНП полезной емкостью 5 м³, оснащенная двумя приводами вращения

Интерес представляет еще одна конструкция печей большой емкости, в которой привод вращения заменен на привод качания, состоящий из двух электро- или гидроприводов, соединенных навстречу (рисунок 10). Корпус печи при этом осуществляет качание на 180–210° до максимального подъема загруженного дисперсного материала и соответственно предельного момента сопротивления повороту печи. Затем переключение двигателей и направления движения приводит к смещению слоя в противоположном направлении и интенсивному перемешиванию материала. При качании активно используются силы инерции. Скорость качания 1–2 качания в минуту.

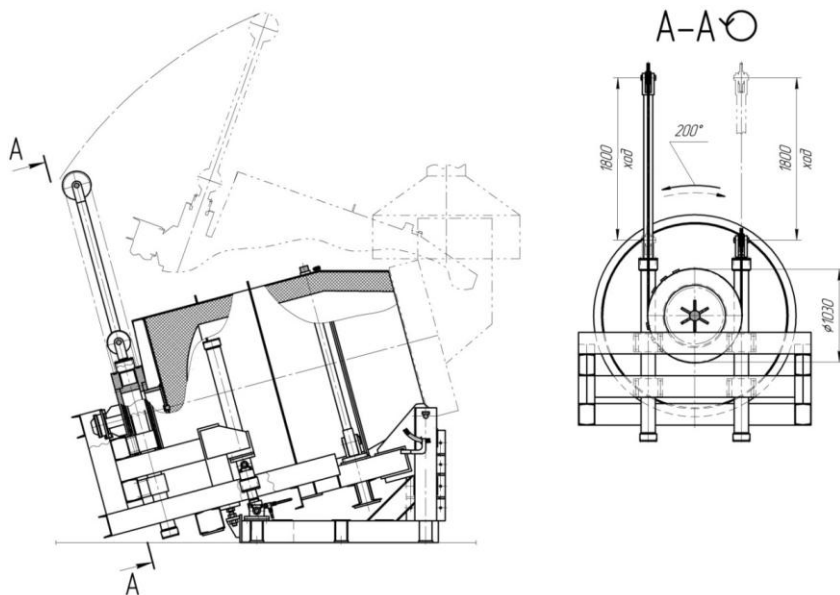


Рисунок 10 – Качающаяся наклоняющаяся печь

Для обеспечения возможности работы (вращения) печи в любом положении по отношению к горизонту крышка печи может устанавливаться не на отдельной стойке, как у печей меньшей емкости, а на той же качающейся платформе, что и корпус печи. При этом открывающаяся часть крышки (рабочее окно) позволяет производить дополнительную завалку шихты или взятие проб, не останавливая плавку.

Расчет корпуса печи. Во время работы корпус ротационной печи испытывает переменные деформации и напряжения, продольные и поперечные изгибающие моменты, тепловые расширения, динамические нагрузки и т.п.

Наибольшие нагрузки (изгибающие моменты) испытывают подбандажные обечайки. Ошибки в расчете корпуса и его деформирование ведет к разрушению футеровки и остановке печи.

Учитывая сложный переменный во времени равнонаправленный характер действующих нагрузок, расчет корпуса на прочность и жесткость носит приближенный характер.

Расчет корпуса на прочность и жесткость производится исходя из следующих предпосылок:

- основными напряжениями в сечениях корпуса являются нормальные напряжения, вызываемые действующими изгибающими моментами;

- в каждом сечении корпуса действуют продольно и поперечно направленные изгибающие моменты;

- действием на корпус крутящего момента можно пренебречь в связи с тем, что касательные напряжения малы по сравнению с напряжениями нормальными, возникающими в результате изгиба.

Так как толщина стенки корпуса меньше $1/20$ радиуса кривизны его сечения, при расчете корпуса на прочность применима гипотеза двухосного напряженного состояния. Поэтому приведенные нормальные напряжения следует определять, исходя из энергетической теории прочности, результаты которой для стальных листовых конструкций наиболее тесно согласуются с практическими данными. При двухосном напряженном состоянии приведенные нормальные напряжения находят по уравнению:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2},$$

где ζ_1 – нормальные кольцевые напряжения, вызываемые продольно направленными моментами; ζ_2 – нормальные меридиональные напряжения, возникающие под действием поперечно направленных изгибающих моментов.

Из-за вращения корпуса нормальные напряжения в его сечениях меняются по симметричному циклу, поэтому за основную механическую характеристику металла при определении напряжений должен приниматься его предел выносливости, вычисляемый по уравнению:

$$\zeta_{-1} = 0,4\zeta_{вр}.$$

Временное сопротивление сталей, применяемых для изготовления корпусов вращающихся печей, равно $3600\text{--}4600$ кгс/см². Следовательно, предел выносливости этих сталей составляет $1450\text{--}1850$ кгс/см².

При расчете корпуса ротационных печей, в том числе РНП, особенно большой емкости, следует принимать во внимание следующие моменты [7]:

- стальные листы, применяемые для изготовления корпуса, сначала вальцуются в холостом состоянии, затем свариваются в отдельные обечайки, которые, в свою очередь, свариваются между собой. Возникающие при этих операциях внутренние напряжения в корпусе в дальнейшем не снимаются;

- действительное распределение усилий на отдельные участки корпуса из-за неточностей, допускаемых при его сборке, а также из-за неравномерного износа сопряженных деталей печи при ее эксплуатации, не может совпадать с идеализированным распределением усилий, определенным при расчете;

- при работе корпус печи находится под действием не только механических усилий, но и тепловых воздействий, часто изменяющихся по своей интенсивности;

- в практических условиях недостижима вполне точная центральная посадка зубчатого венца на корпус печи, поэтому вращение корпуса, осуществляемое через венец и малую ведущую шестерню, которые имеют большое передаточное число и, следовательно, небольшую степень перекрытия зацепления, не протекает плавно, а сопровождается вибрациями;

- при сборке корпуса его отдельные обечайки не подвергаются никаким предварительным испытаниям;

- внутренняя и внешняя поверхности корпуса подвержены коррозии;

- корпус печи является ее главной частью, причем самой крупной, сложной и дорогой;

- дефекты и поломки корпуса вызывают остановку всей печи и приводят к преждевременному разрушению футеровки и значительной бесполезной потере тепла.

Учитывая вышеперечисленное, коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше четырех.

Основная внешняя нагрузка, испытываемая корпусом, складывается из его собственного веса, веса футеровки и загруженного в печь материала. Собственный вес и вес футеровки равномерно распределены по длине отдельных участков корпуса. На корпус действуют также сосредоточенные нагрузки – это вес зубчатого венца и банки

дажа. Вес загруженного в печь материала вплоть до его перехода в жидкую фазу (расплавления) вносит динамическую составляющую в испытываемые корпусом нагрузки.

Собственный вес и вес футеровки определяют обычно на 1 п.м длины корпуса. Если он цельносварной, то при удельном весе стали $\gamma = 7,8 \text{ кг/дм}^3$ п.м корпуса весит

$$q_{\text{св}} = 24,5D_{\text{н}}\delta, \text{ кг},$$

где $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр корпуса, м; δ – толщина стенки корпуса по длине рассматриваемого участка, мм.

Вес футеровки, уложенной на 1 п.м длины корпуса, равен

$$q_{\text{ф}} = \pi D_{\text{ср}}\delta\gamma_{\text{ф}}, \text{ кг},$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр кольца футеровки, м; δ – толщина футеровочного слоя, мм; $\gamma_{\text{ф}}$ – объемный вес футеровочного материала, кг/дм^3 (для хромомагнезита – 2,27, шамота – 2,1).

При работе печи материал смещается в сторону вращения печи, поэтому и равнодействующая нагрузок на корпус несколько смещена от вертикали, проходящей через центр сечения корпуса.

Под действием перечисленных внешних нагрузок в поперечных сечениях корпуса возникают продольно направленные опорные и межопорные изгибающие моменты.

Опорные изгибающие моменты корпуса определяют при помощи уравнения трех моментов или методом последовательных приближений.

Для корпуса с равномерно распределенной нагрузкой по длине пролетов уравнение трех моментов имеет вид:

$$M_{n-1} = \frac{l_n}{J_n} + 2M_n \left(\frac{l_n}{J_n} + \frac{l_{n+1}}{J_{n+1}} \right) + M_{n+1} \frac{l_{n+1}}{J_{n+1}} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{q_n l_n^3}{J_n} + \frac{q_{n+1} l_{n+1}^3}{J_{n+1}} \right),$$

где M_n – изгибающий момент опоры n , т-м; l_n – длина пролета, расположенного перед опорой n , если вести отсчет слева направо, м; J_n – момент инерции сечения пролета n , м^4 ; q_n – нагрузка, приходящаяся на 1 п.м длины пролета, т.

Если кроме равномерно распределенной нагрузки, в рассматриваемом пролете действует сосредоточенная сила P , приложенная на расстоянии c и d от левой и правой опор, то в правую часть уравнения трех моментов вводится добавочное слагаемое. Оно имеет вид:

$$Pcd\left(1 + \frac{c}{l}\right).$$

Загрузочный и разгрузочный концы корпуса являются консольными (для РНП – это коническая часть корпуса с загрузочным окном).

Выводы. Разработка и совершенствование ротационных наклоняющихся печей и технологических процессов их использования для рециклинга низкосортных дисперсных металлоотходов позволяет вернуть их в металлооборот без предварительной подготовки с использованием практически любых восстановителей и любого топлива, позволяет перерабатывать отходы в местах их образования и получать высококачественные шихтовые материалы и/или литейные сплавы.

В масштабах Республики Беларусь переработка только вновь образующихся отходов такого рода позволит ежегодно возвращать в производство до 150 тыс. т чугуна и стали. Учитывая расчетную стоимость получаемого металла (150–200 тыс. долл. США за 1 т), рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на металлургических и машиностроительных предприятиях, составит не менее 50–75 %, а возврат инвестиций – не более 9–12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от 1–2 тысяч до десятков тысяч тонн перерабатываемых отходов в год.

Литература

1. Ровин, С.Л. Восстановление оксидов железа в ротационных печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц // Литье и металлургия. – 2011. – № 1. – С. 38–45.
2. Шмитц, К. Роторно-поворотная барабанная печь: современная технология в производстве вторичного алюминия / Шмитц К. //

Металлургическое производство и технология металлургических процессов. – Германия, Дюссельдорф. – 2006. – № 1. – С. 30–41.

3. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

4. Теплообмен излучением: Справочник / Под ред. А.Г. Блоха, Ю.А. Журавлева, Л.Н. Рыжкова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

5. Ровин, С.Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов / С.Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2014. – № 1. – С. 56–61.

6. Кривандин, В.А. Металлургическая теплотехника: Учебник : в 2 т. Т.2. Конструкция и работа печей / В.А. Кривандин, В.А. Артюнова, Б.С. Мاستрюков; под науч. ред. В.А. Кривандина. – М.: Металлургия, 1986. – 486 с.

7. Лисиенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справочное издание в 2 кн. Кн. 2 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплотехник, 2004. – 544 с.

УДК 669.041

С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ, канд. техн. наук,
Н.Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНСТАНТЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ МНЛЗ*

В технической литературе ежегодно появляется значительное количество публикаций, посвященных исследованиям теплофизических процессов, протекающих в заготовке при затвердевании в условиях МНЛЗ. Несмотря на это, данная тема по-прежнему представляет интерес для специалистов в области металлургии и не теряет своей актуальности.

Основным направлением современных исследований следует считать совершенствование физико-математических моделей про-