

- 5 Goldratt Eliyahu M. The haystack syndrome: sifting information out of the data ocean. – NY.: North River Press, 1990. – 262 p.
- 6 Goldratt Eliyahu M., Cox Jeff. The Goal: process of ongoing improvement. – NY.: North River Press, 1992. – 271 p.
- 7 Noreen E., Smith D., Mackey James T. The theory of constraints and its implications for management accounting. – NY.: North River Press, 1995. – 187 p.
- 8 Goldratt Eliyahu M., Fox Bob E. The race. – NY.: North River Press, 1986. – 179 p.
- 9 Детмер У. Теория ограничений Голдратта: системный подход к непрерывному совершенствованию. - Издательство Альпина Бизнес Букс, 2008 - 443 с.
- 10 Лубуж П. «World Class Manufacturing: инструмент выживания»// Strategy.ru осень 2011. 2011. – С. 40-43
- 11 Шухгальтер М. / Проблемы экономики ремонта оборудования на российских промышленных предприятиях / М. Шухгальтер// Экономика и жизнь. 2009. №26. – С. 20-27
- 12 Евстафьев И.Н. Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // Металлург. 2009. №3. – С. 30-33.



УДК 621.745

С.Л. Ровин

Научно-производственное республиканское
унитарное предприятие «Технолит»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: technolit@tut.by
Дата поступления 22.04.2016

КОНСТРУКЦИЯ РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ

Аннотация

Ротационные наклоняющиеся печи (РНП) – новый тип топливных печей, обеспечивающий наиболее эффективный нагрев и переработку (рециклинг) дисперсных металлоотходов. В отличие от традиционно применяемых в литейных и металлургических цехах дуговых, индукционных, отражательных и шахтных плавильных печей РНП не требуют предварительной подготовки дисперсного сырья: удаления влаги, очистки от масел, гомогенизации, окомковывания и т.д.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования движения материалов и газового неизотермического потока в РНП, даны рекомендации по расчету и конструированию ротационных наклоняющихся печей.

Апробированные технические решения расширяют сферы применения РНП в литейном и металлургическом производстве, открывают перспективу создания рентабельного малотоннажного рециклинга образующихся на предприятиях дисперсных отходов черных и цветных металлов.

Ключевые слова: ротационные наклоняющиеся печи, рециклинг, дисперсные металлоотходы, процессы тепломассообмена, компьютерное моделирование.

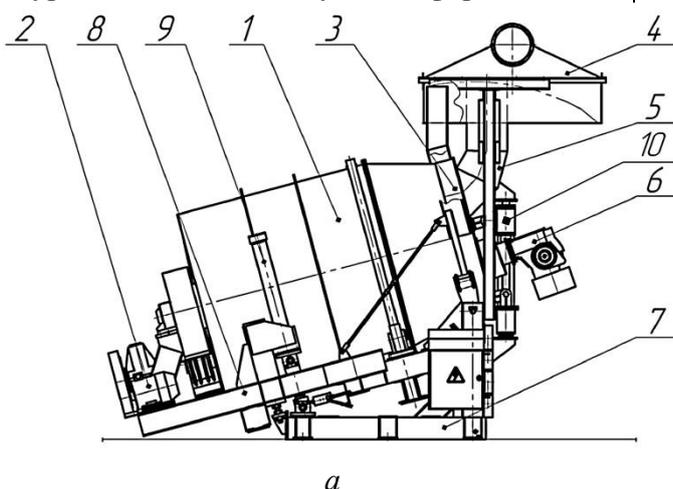
Введение

Ротационные наклоняющиеся плавильные печи (РНП), появившись относительно недавно – в 90-х годах прошлого столетия, благодаря существенным техно-

логическим преимуществам нашли широкое применение во вторичной металлургии алюминиевых, медных, свинцовых и других цветных сплавов, как наиболее эффективный агрегат для рециклинга дисперсных

отходов [1]. РНП успешно позволяют переработать не только металлические – мелкий скрап, высечку, обрезь, стружку и т.п., но и многокомпонентные отходы, состоящие в основном из соединений металлов, – шламы, аспирационную пыль, шлаки и т.д. (рисунок 1). Так, в процессах получения черного свинца из аккумуляторного лома РНП составляют сегодня около 60% всего парка плавильных агрегатов [2].

Термический к.п.д. (т.к.п.д.) ротационных наклоняющихся печей при нагреве дисперсных материалов, например стружки, в 2-3 раза превышает т.к.п.д. индукционных и дуговых печей, а также традиционных короткобарабанных, и в 4-5 раз т.к.п.д. печей отражательного типа. РНП обеспечивают возможность ведения методического режима 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 [3].

Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. Печи позволяют в случае необходимости провести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродосодержащие материалы, в том числе дисперсные отходы вплоть до лигнина. Достоинством таких печей являются относительно низкие инвестиционные затраты, компактность, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов.



Рисунок 1. Ротационная наклоняющаяся печь:

- а* – общий вид (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; 10 – опорная стойка и привод поворота крышки);
б – РНП для производства черного свинца из аккумуляторного лома емкостью 3,5 тонны

РНП наилучшим образом отвечают задаче переработки дисперсных влажных, загрязненных маслами и случайными неметаллическими примесями металлоотходов, позволяя исключить необходимость их предварительной подготовки: сушки, очистки, гомогенизации, окомковывания и т.д.

Исследования и практические результаты, полученные белорусскими учеными

(НП УП «Технолит», ГГТУ им. П.О. Сухого, БНТУ), свидетельствуют о перспективе использования РНП и для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов, как достойной альтернативе известным методам получения железа для стран и регионов с развитым машиностроением, не имеющих собственных ГОКов и полномасштабного металлургического производства [3].

Основная часть

1. Движение материала.

Движение дисперсного материала во вращающихся (ротационных) печах определяется силами аутогезии (межчастичных связей), внутреннего трения в слое, силами адгезии и внешнего трения на границе «материал-футеровка», силами инерции (в том числе центробежными) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц активно действуют аэродинамические силы вращающегося скоростного потока газов.

При увеличении скорости вращения корпуса печи, интенсивность перемешивания повышается. Чем больше силы аутогезии и сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушивается) слой. В первом приближении для понимания механики движения материалов в ротационных печах различного типа может быть использована известная модель, описывающая поведение шаров во вращающемся барабане (рисунок 2) [4].

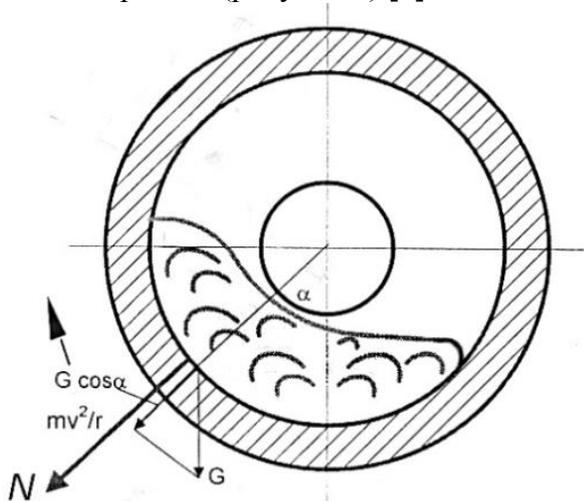


Рисунок 2. Схема распределения сил, действующих на материал в шаровой модели

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

$$N = \frac{m \cdot v^2}{r} \pm m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где m – масса рассматриваемой частички материала, кг;

v – мгновенная линейная скорость частички материала, м/с;

r – расстояние от оси вращения до частички (в данном случае – внутренний радиус барабана), м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

α – угол поворота (смещения частички) относительно вертикальной оси, град.

Во время вращения барабана, сила N вызывает трение между частицами материала и поверхностью барабана, в результате чего, происходит «прилипание» частиц к поверхности ($F_{TP} = N \cdot K_{TP}$, где K_{TP} – коэффициент трения) их подъем и ускорение. Силы межчастичного взаимодействия и адгезии материала к поверхности печи в шаровой модели не учитываются.

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 падает или соскальзывает вниз по поверхности слоя.

При критической скорости ($v_{кр}$) центробежная сила уравнивает вес частички. Если достигнута или превышена эта скорость, материал не отрывается от внутренней поверхности барабана даже в верхней точке, когда $\cos \alpha = 1$

$$\frac{m \cdot v_{кр}^2}{r} = m \cdot g, \text{ отсюда } v_{кр} = \sqrt{g \cdot r} \quad (2)$$

Чтобы такая ситуация имела место для печи с внутренним радиусом $r=1$ м, скорость вращения должна быть не менее 30 об/мин. В тоже время ротационные нагревательные и плавильные печи имеют скорость вращения, как правило, не более 3–6 об/мин. Поэтому центробежные силы не играют здесь определяющую роль.

На практике подъем материала и его обрушение (соскальзывание) в большей мере зависят от степени наполнения печи, сил внутреннего трения в слое и внешнего трения на границе «материал – поверхность печи». Под действием этих сил при вращении печи дисперсные материалы занимают сегмент, соответствующий углу 120–160°. Часть слоя, увлекаемая подложкой (поверх-

ностью футеровки), достигает точки отрыва (угол $90-120^\circ$ к вертикали) и под действием силы тяжести скатывается (соскальзывает) по поверхности слоя.

Существенное значение имеет также форма частиц материала, которая у большинства металлоотходов существенно отличается от шаровидной. Так, например, характерными элементами стружки и окарины являются пластинки (чешуйки), имеющие коэффициент формы (f_ϕ) от 1,5-2 до 7-7,5 [5].

В сечении слоя, перпендикулярном оси вращения печи, образуется так называемый «чечевицеобразный» профиль. Эта

форма наблюдается как в промышленных печах, так и на имитационных моделях (рисунок 3).

В общем случае в поперечном сечении слоя можно выделить две характерных зоны. Первую – циркуляционную зону образует периферия, примыкающая к свободной поверхности слоя и поверхности, соприкасающейся с корпусом печи. Материал в этой зоне движется наиболее активно: захватывается поверхностью печи, поднимается вверх, отрывается в верхней точке от стенки печи, обрушивается и скользит по свободной поверхности слоя.

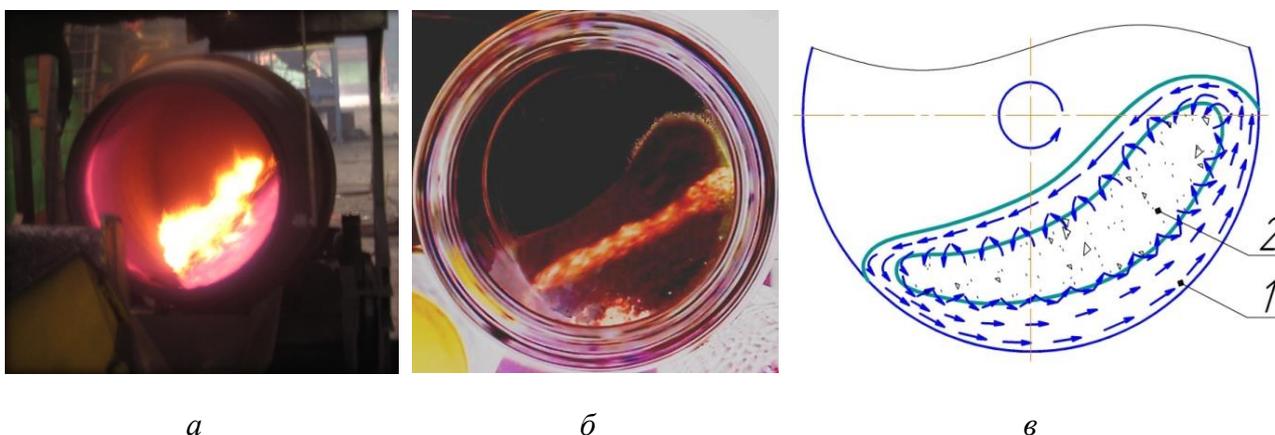


Рисунок 3. Положение дисперсного материала при вращении:
а – высокотемпературный нагрев стружки в РНП; *б* – имитационная модель;
в – схема поперечного сечения слоя материала в ротационной печи
 (1 – циркуляционная зона; 2 – центральная зона (ядро))

Вторая – центральная зона образуется внутри слоя. В этой зоне, формирующей ядро слоя, материал движется медленнее. Частицы покидают этот слой, увлекаемые материалом, движущимся в циркуляционной зоне. В свою очередь материал из циркуляционной зоны тоже переходит (выпадает) в центральную зону. Таким образом, происходит постоянный переход материала из зоны в зону. Решающее влияние на размеры центральной зоны и перемешивание материала оказывают силы аутогезии и геометрия частиц материала.

В верхней части сечения слоя имеет место характерное утолщение – «вал», образующийся в результате отрыва от поверхности печи и остановки или замедления движения материала. В средней части сво-

бодной поверхности образуется характерная впадина: скорость движения частиц в момент обрушения или соскальзывания увеличивается, затем по ходу скольжения по поверхности материала уменьшается, а угол наклона свободной поверхности слоя приближается к углу естественного откоса материала. Прогиб (впадина) на свободной поверхности слоя тем глубже, чем выше скорость вращения печи.

В нижней части свободной поверхности (поверхности скольжения) скорость движения материала уменьшается, что приводит к образованию второго «вала», аналогичного верхней части сечения. Частицы, достигшие поверхности печи, вновь подхватываются и устремляются по образующей вверх.

Нагрев дисперсных материалов сопровождается значительными изменениями состояния их поверхности и адгезионных свойств, уменьшением внутреннего трения в слое и внешнего трения на поверхности печи. Зачастую меняется и дисперсность материала, например, дисперсность чугунной стружки и окалины при высокотемпературном нагреве в РНП увеличивается в 2-3 раза. Это приводит к изменению профиля слоя: угол подъема и сектор, занимаемый материалом, уменьшаются, положение и конфигурация слоя приближаются к форме и положению, которое занимает жидкость (расплав) в подобных условиях [3].

В РНП помимо движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения печи, материал перемещается и в продольном

направлении. Это происходит благодаря углу наклона ($12-18^\circ$) оси печи к горизонтальной плоскости, что заставляет материал продвигаться по спирали к днищу печи, а затем снова – вперед к горловине (рисунок 4). Дополнительные движения усиливают процессы разрушения и перемешивания внутри слоя материала.

В сечении, перпендикулярном оси вращения, частицы, находящиеся во внешнем слое, перемещаются непрерывно: в зоне, примыкающей к поверхности печи, они двигаются по окружности за счет сил адгезии и внешнего трения, а на свободной поверхности слоя скользят под действием сил гравитации и инерции, преодолевающих силы аутогезии.

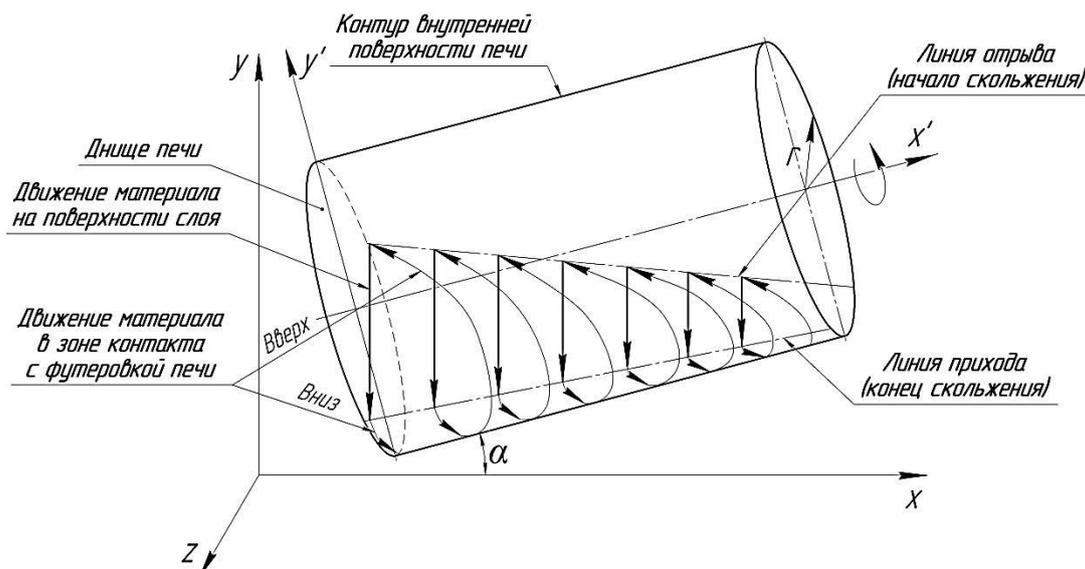


Рисунок 4. Траектория движения частиц дисперсного материала в РНП

В продольном направлении (вдоль оси вращения) от горловины печи к ее днищу частицы материала перемещаются пульсационно – в момент обрушения слоя или скольжения по его поверхности. Таким образом, материал перемещается к днищу печи, где накапливаясь, образует «придонный вал». После достижения критического уровня верхний слой от днища сдвигается к горловине, создавая встречное движение материала в осевом направлении.

В результате материал в РНП совершает винтовое возвратно-поступательное движение, обеспечивающее активное пере-

мешивание, как в радиальном, так и в продольном направлении, в отличие от однонаправленного движения в барабанных печах традиционного типа.

Скорость движения частиц, находящихся на поверхности печи (v_n^1), определяется скоростью вращения печи и условиями трения на границе «материал – футеровка»:

$$v_n^1 = k \cdot (\omega \cdot r), \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала по поверхности печи ($k \leq 1$);

ω – угловая скорость вращения печи, рад./с.

Скорость движения материала, скользящего по свободной поверхности слоя, определяется перепадом высот (ΔH) между точкой начала скольжения (отрыва) и точкой его завершения, профилем поверхности, углом наклона оси печи к горизонту (α), а также силами инерции, тяжести и аутогезии. В общем случае для скорости движения частиц по свободной поверхности в осевом направлении (v_o^{11}) можно записать:

$$v_o^{11} = \sqrt{\Delta H \cdot a_o \cdot \sin \alpha} . \quad (4)$$

Для скорости движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения (v_n^{11}):

$$v_n^{11} = \sqrt{\Delta H \cdot a_n \cdot \cos \alpha} , \quad (5)$$

где a_o и a_n – осевая и радиальная составляющие ускорения (a) движения частицы по свободной поверхности слоя. В первом приближении можно записать:

$$a = g - \gamma g , \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения;

γ – коэффициент трения движения частицы по свободной поверхности слоя, γ зависит от сил межчастичного сцепления, состояния поверхности частичек, их формы, размеров и других факторов.

Описанный характер движения подтверждается исследованиями поведения материала, помещенного в прозрачную емкость – имитационную модель, соответствующую РНП по соотношению основных геометрических параметров, пространственному расположению и динамическим характеристикам ($Re_{мод} \approx Re_{РНП}$). На рисунке 5 с использованием имитационной модели показано перемещение поверхностного прогретого слоя материала в процессе вращения печи – выделены мгновенные положения слоя, соответствующие количеству совершенных оборотов и текущему углу поворота корпуса печи.

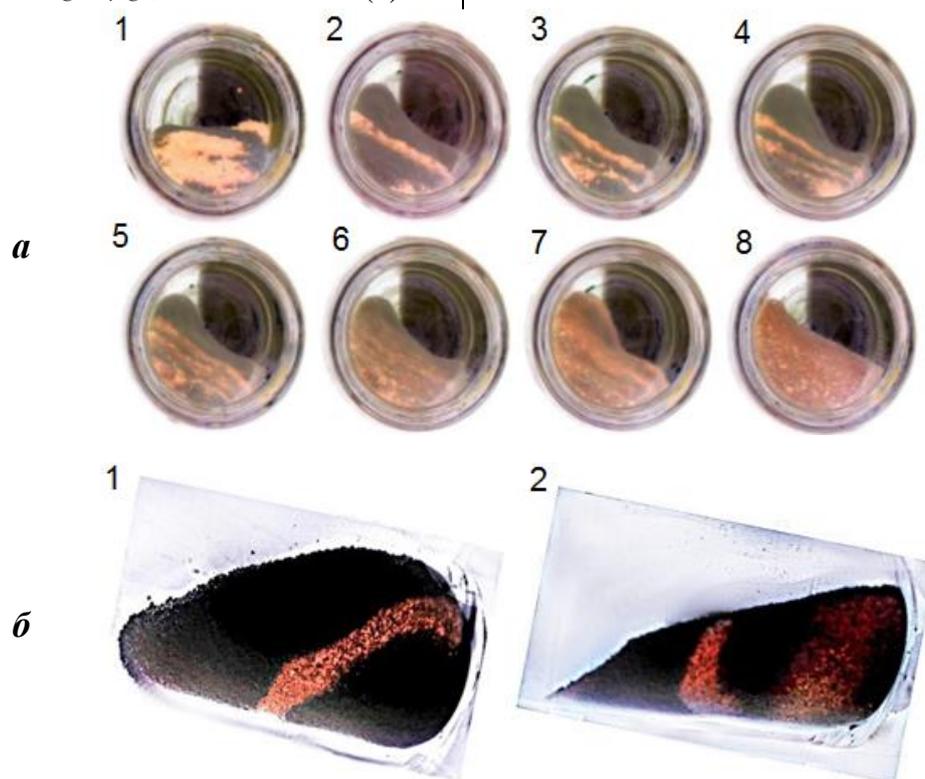


Рисунок 5. Перемещение нагретого слоя в имитационной модели РНП:

- a* – вид со стороны горловины модели (1 – исходное положение, верхний слой прогрет; 2 – положение слоя через 1 оборот после начала вращения; 3 – через 1,5 оборота; 4 – 3 оборота; 5 – 5 оборотов; 6 – 7 оборотов; 7 – 9 оборотов; 8 – 10 оборотов, вращение остановлено, прогретый слой равномерно распределен в общем объеме материала);
- б* – поверхность материала, примыкающая к прозрачной стенке модели (1- через 1 оборот после начала вращения; 2 – через 3 оборота)

Для количественной оценки параметров движения материала в РНП было проведено компьютерное моделирование процесса с помощью прикладного программного пакета (ППП) CD-Adapco Star CCM+11 (рисунки 6, 7). Моделирование позволило определить характер распределения скоростей в сечении слоя материала и их изменение в зависимости от параметров слоя, внутреннего трения и условий на границе «материал-поверхность печи».

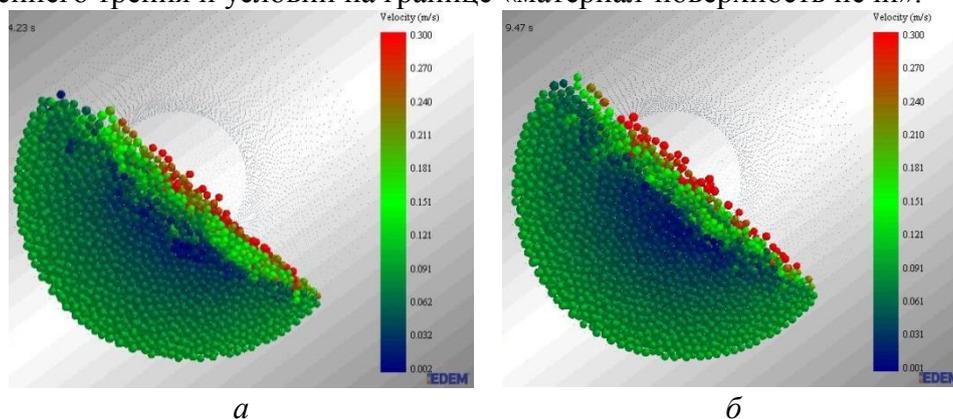


Рисунок 6. Мгновенное поле скоростей в поперечном сечении слоя материала (ось вращения РНП наклонена к горизонту под углом $\alpha=15^\circ$, внутренний радиус печи $r = 0,6$ м, скорость вращения $n=2$ об/мин): а – $\tau=4,23$ с; б – $\tau=9,47$ с.

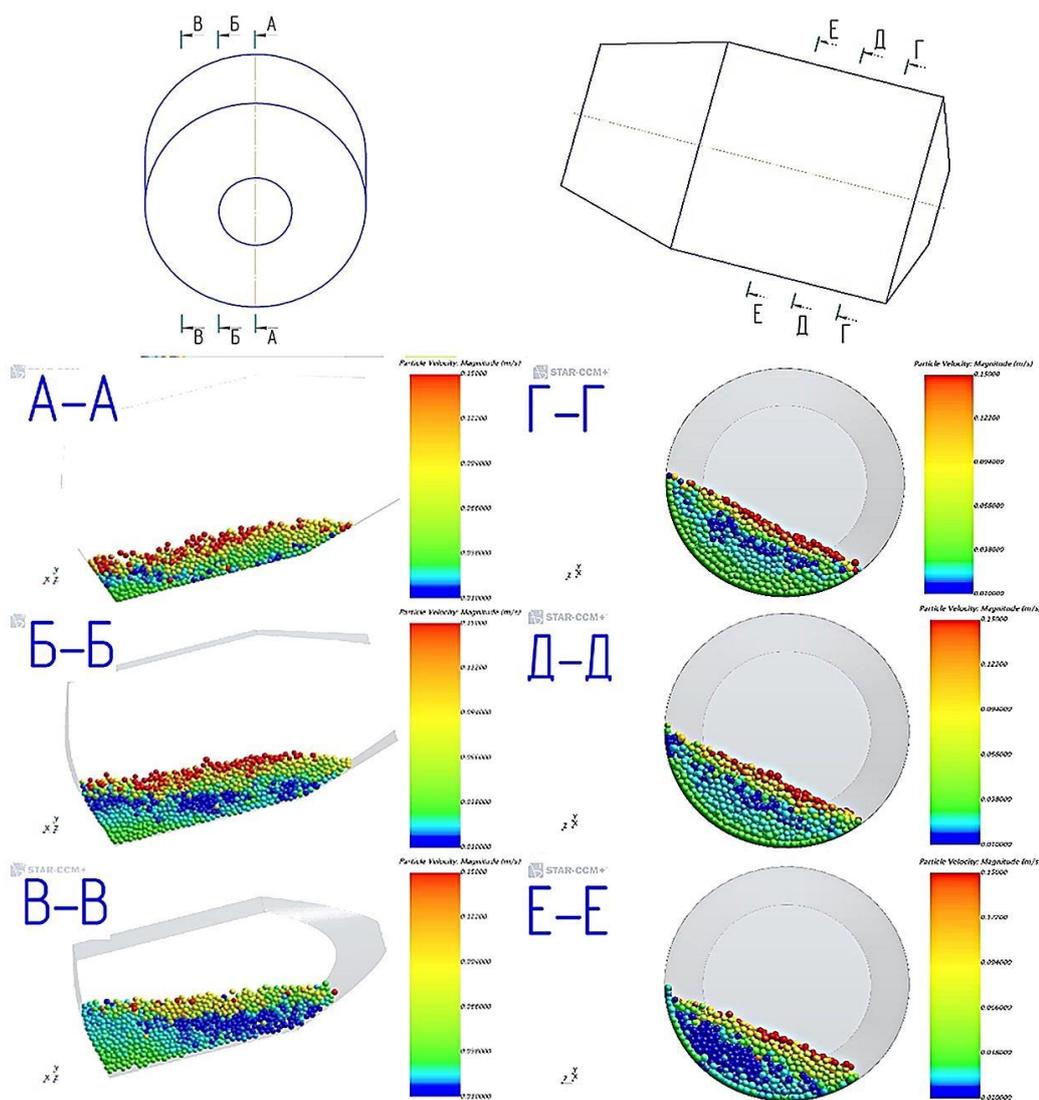


Рисунок 7. Поле скоростей в различных продольных и поперечных сечениях РНП ($\alpha=15^\circ$, $r = 0,45$ м, $n = 1$ об/мин)

В результате моделирования было выявлено, что скорости частиц на свободной поверхности слоя могут в 3 и более раз превышать скорости движения частиц, находящихся на поверхности печи. Моделирование подтвердило, что в радиальном (поперечном) сечении слоя материала условно могут быть выделены относительно неподвижное ядро и активно циркулирующая вокруг него периферийная зона. При этом скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки и даже сотни раз, однако четкой границы между зонами не существует. Поле скоростей в сечении слоя, размеры и форма ядра, а также его расположение относительно свободной поверхности слоя изменяются во времени (рисунок 6).

Кроме того, распределение скоростей меняется в зависимости от расстояния рассматриваемого сечения относительно днища или горловины печи (рисунок 7). Уменьшение сил внешнего трения при уменьшении толщины слоя и связанное с этим проскальзывание материала приводит к смещению зоны низких скоростей к поверхности печи. Чем дальше рассматриваемое сечение от днища печи тем ближе ядро слоя к ее поверхности.

2. Движение газовых потоков

Наиболее эффективным способом передачи тепла полидисперсному материалу является продувка слоя горячими газами. Для того, чтобы уменьшить сопротивление слоя и обеспечить контакт горячих газов со всеми элементами (частицами) слоя материал должен быть переведен в подвижное (взвешенное) состояние. Эти условия в полной мере обеспечиваются при переработке полидисперсных материалов в ротационных печах.

В общем случае тепло во вращающихся печах, в том числе РНП, передается шихтовому материалу: излучением от факела и стен печи, теплопроводностью от стен печи при соприкосновении с материалом и внутри слоя, конвекцией от потока горячих газов. При этом наиболее существенную роль играет конвекция [6,7].

Однако ограничения по скорости движения газа-теплоносителя (v_z), которая

из-за опасности уноса дисперсного материала не может превышать скорость витания частиц ($v_{вит}$), не позволяют получить высокий коэффициент конвективной теплоотдачи (α_k), который возрастает пропорционально $\sqrt{v_z}$, и реализовать в полной мере преимущества динамического продуваемого слоя в традиционных короткобарабанных плавильных печах, где газы движутся линейно вдоль оси печи от горловины к хвостовой части.

В РНП газы совершают сложное вращательное петлеобразное (возвратно-поступательное) движение. Движение газов в нижней и верхней части рабочего пространства происходит навстречу друг другу, при этом потоки активно перемешиваются.

Переход от прямого движения газового потока в короткобарабанных печах к петлеобразному в РНП позволяет значительно в 1,5-2 раза увеличить т.к.п.д. процесса нагрева и плавки дисперсного материала и снизить пылеунос.

Во вращающихся печах, где используется механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен в значительной степени зависит от соотношения толщины внешней динамической продуваемой части слоя и его относительно неподвижной внутренней части, границу между которыми определяет скорость фильтрации газа (v_ϕ). Толщину динамического продуваемого слоя можно определить по сопротивлению ($\Delta p_{сл}$), которое не должно быть больше скоростного напора потока газов в печи. Скорость газов в РНП обычно $v_z \approx 10-25$ м/с. Отсюда:

$$\Delta p_{сл} \leq \frac{136v_z^2 \rho_g}{273+t}, \quad (7)$$

где ρ_g – плотность газов, кг/м³;

t – температура газов, °С.

Эмпирические уравнения, определяющие интенсивность теплообмена в динамическом слое, полученные для соотношений характерного размера слоя (h) и частиц (d) $h/d \geq 40$ и порозности слоя $\epsilon_{сл} \geq 0,4$, в критериальном виде могут быть записаны следующим образом:

$$Nu_{сл} = \frac{\alpha_{сл} d}{\lambda_g} = 6,9 Re^{0,47}, \quad (8)$$

$$\alpha_{сл} = \alpha_n \left(1 + 4 \left(\frac{v_m}{v_\phi}\right)^{0,36}\right), \quad (9)$$

где $\alpha_{сл}$ – коэффициент теплообмена (теплотдачи) в динамическом слое, Вт/(м²·К);

α_n – коэффициент теплообмена в неподвижном слое, Вт/(м²·К);

v_m – скорость движения материала, м/с.

Градиент температур в динамическом продуваемом слое уменьшается в 10-15 и более раз с 3000-5000 К/м до 100-200 К/м, при этом объемный коэффициент теплопередачи (α_v) увеличивается с 3-4 Вт/(м³·К) в неподвижном слое до 1000-3000 Вт/(м³·К) в динамическом слое.

Петлеобразное движение газов в РНП приводит к осаждению частиц у днища печи и в циркуляционной зоне перед крышкой. За счет подсасывающего действия факела частицы снова увлекаются в поток газов. Благодаря сложному петлеобразному движению газов в РНП, в отличие от прямоточных барабанных печей, линейные скорости во вращающемся потоке могут достигать 20-25 м/с. Соответственно увеличивается и скорость фильтрации (v_ϕ) и глубина продуваемого слоя.

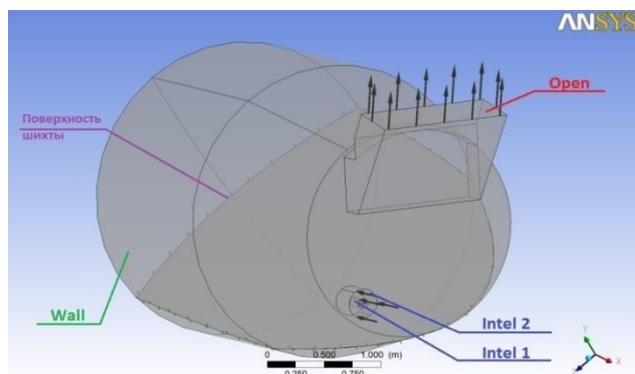
Течение газов в ротационных печах отличается большой сложностью и несимметричностью, сочетанием прямых и обратных токов, наличием циркуляционных зон, изменением параметров во времени и в пространстве.

Исследования и количественная оценка движения газовых неизотермических потоков в РНП выполнялись с использованием компьютерного моделирования на базе расчетных моделей, учитывающих нестационарные режимы движения и теплообмена.

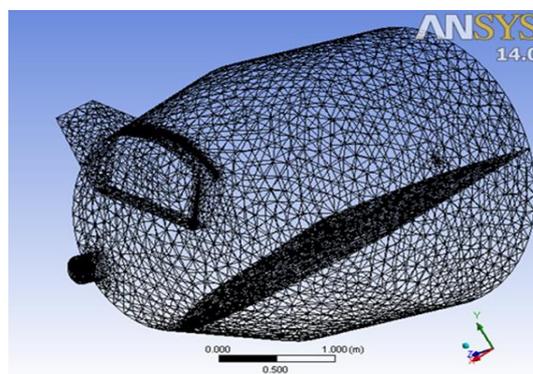
Расчётная область представляет собой рабочее пространство печи с полной загрузкой (рисунок 8). Горелка – двухпроводная низкого давления. Основным топливом является природный газ (метан), в качестве окислителя применяется воздух в соотношении 1/10. В исследовании моделировались следующие процессы: горение газозвушной смеси, турбулентность в реагирующей среде, движение газового потока, конвективный и лучистый теплообмен.

Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей, давлений, траектории движения газового потока, концентрации топлива, окислителя, продуктов реакции, а также конвективные и лучистые потоки.

Моделирование осуществлялось с помощью ППП Solid Works Flow Simulation и ANSYS CFX [8,9]. Движение газового потока описывалось с помощью системы уравнений Навье-Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния, а изменения температуры – в соответствии с уравнением Фурье-Кирхгофа.



а



б

Рисунок 8. Трехмерная модель ротационной печи (а) и расчетная конечноэлементная сетка (б)

Тепловой баланс проверялся путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III и IV рода для динамического слоя материала при замене коэффициента теплопроводности материала (λ) на приведенный коэффициент теплопередачи ($\alpha_{пр}$) для продуваемого слоя.

Для решения системы уравнений были приняты следующие допущения: фазовое состояние материала не изменяется, характер движения газового потока турбулентный, газ сжимаемый.

Дифференциальная система уравнений Навье-Стокса сохранения массы, импульса и энергии для нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат ($x_i, i = 1, 2, 3$), вращающейся вокруг оси, проходящей через ее начало, имеет следующий вид [6, 7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) = S_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H \quad (12)$$

где t – время; u – скорость потока; ρ – плотность потока; P – давление потока; S_i – внешние массовые силы; E – полная энергия единичной массы потока; Q_H – тепло, выделяемое источником в единичном объеме потока; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_k – диффузионный тепловой поток.

При проведении компьютерного моделирования ставилась задача определения оптимальных геометрических параметров рабочего пространства печи, выбора места расположения и поворота горелки, длины факела и расхода топлива.

На рисунках 9-12 представлены некоторые результаты моделирования движения газового потока в рабочем пространстве РНП при различных вариантах установки горелок [3].

При расположении горелки в нижней правой четверти крышки и вращении печи против часовой стрелки (рисунок 9) видно, что факел горячих газов, встречаясь со слоем материала на входе в печь, отклоняется, образуя многочисленные вихри. Слой, прилегающий к крышке печи, прогревается меньше, чем у днища. Образующиеся вихревые потоки препятствуют проникновению нагретого потока вглубь материала. Эффективность нагрева снижается, увеличиваются потери тепла (рисунок 10).

Наиболее рациональным при заданном направлении вращения печи (против часовой стрелки) является расположение горелки внизу слева, то есть со стороны, где слой материала минимален, с поворотом под углом $7,5^\circ$ к поверхности материала. При этом пламя не упирается в слой, обеспечивается максимальная настильность пламени, поток по дуге омывает всю поверхность материала, максимально передавая тепло и проникая глубоко в слой между его частицами (рисунки 11, 12).

Такое расположение горелки позволяет повысить эффективность теплообменных процессов и, соответственно, сократить продолжительность цикла плавки в целом.

Как показали исследования для печей большой емкости (с объемом рабочего пространства 15-20 м³) наиболее рациональным является установка двух горелок с направлением факела по касательной к поверхности материала.

Эффективная работа РНП возможна только при условии, что газовый поток омывает днище печи. Для этого динамический напор газового потока должен быть выше суммы сопротивления потоку, включая сопротивление пересыпающегося слоя материала. Короткий факел не обеспечивает необходимый прогрев задней части печи и днища, где находится основная часть материала в РНП. Это значительно снижает эффективность нагрева материала, увеличивает время его нагрева и плавки.

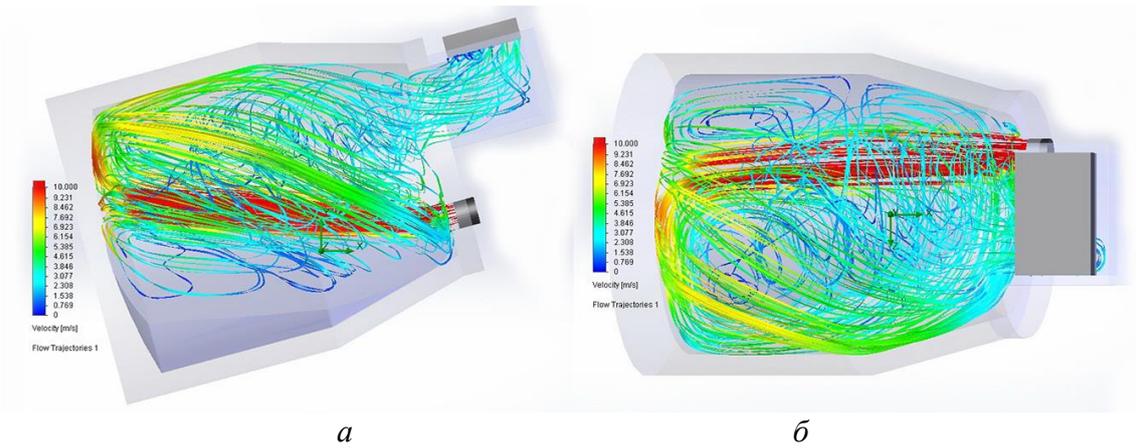


Рисунок 9. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки справа: *а* – вертикальное сечение печи; *б* – горизонтальное сечение

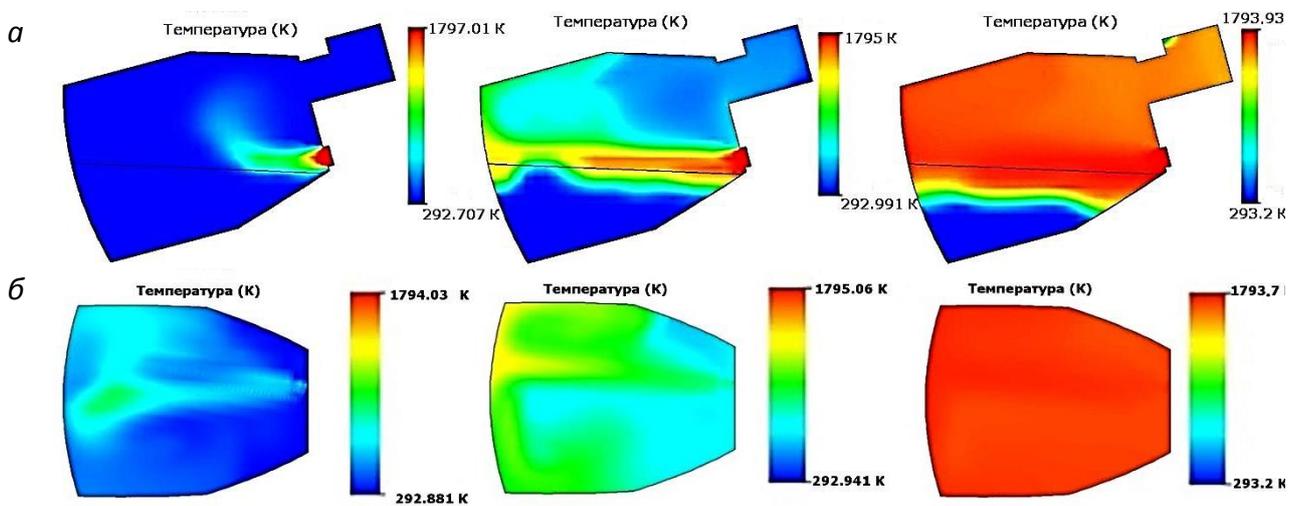


Рисунок 10. Распределение температур в ротационной печи, горелка справа: *а* – вид сбоку – распределение температур по сечению печи, совпадающему с осью горелки; *б* – вид сверху – распределение температур в горизонтальных сечениях

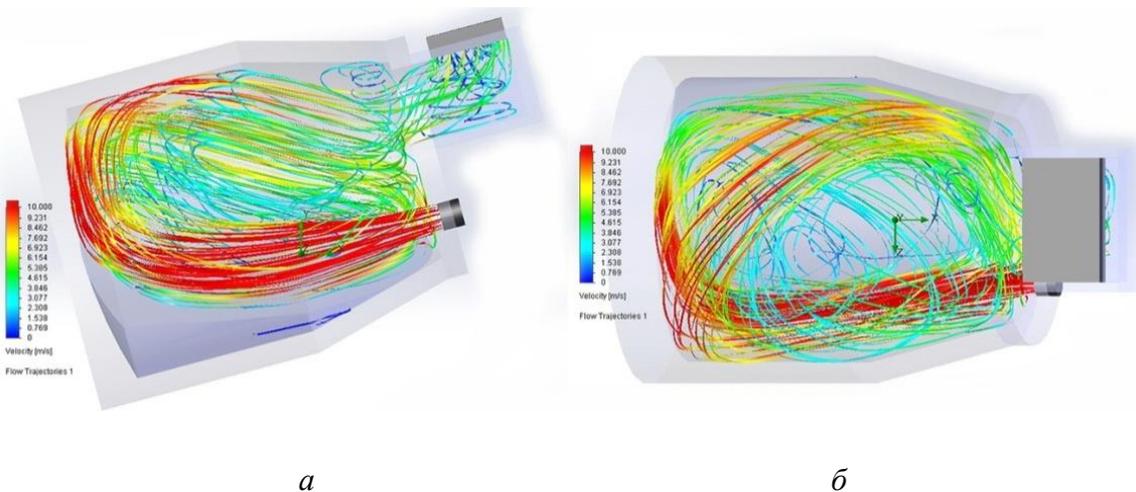


Рисунок 11. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки слева: *а* – вертикальное сечение; *б* – горизонтальное сечение

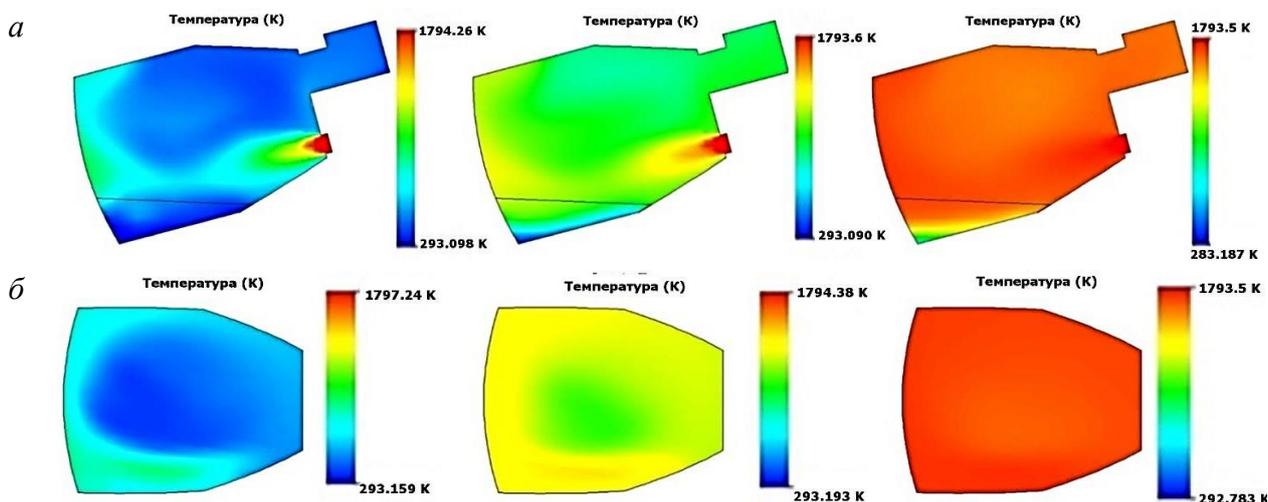


Рисунок 12. Распределение температур в ротационной печи, горелка слева:
 а – вид сбоку – сечение по горелке; б – вид сверху – распределение температур в горизонтальных сечениях.

Взаимодействие газового потока с дисперсным материалом, как и конфигурация потоков в печи, зависит не только от режимов работы горелок, вращения печи и скорости потока, но и от расположения горелок: в центре или со сдвигом в сторону вращения печи или в противоположную, от числа горелок, угла ввода газов относительно поверхности материала (угла атаки).

Результаты компьютерного моделирования были подтверждены данными натурных испытаний и замерами, проводившимися при апробации РНП различного назначения и емкости.

3. Требования к конструкции РНП.

Моделирование аэродинамики и теплообменных процессов, исследование процессов движения дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах и опыт их эксплуатации позволили сформировать основные требования к геометрическим параметрам рабочего пространства печей такого типа, расположению и углу наклона горелочных устройств, скорости вращения и углу наклона корпуса при разогреве и расплавлении шихтовых материалов, пределам качания печи от рабочего положения до положения слива расплава и т.д.

Для РНП оптимальным с точки зрения эффективности теплообменных процессов и удобства обслуживания является рабочее

пространство, имеющее форму цилиндра с горловиной в виде усеченного конуса и сферическим дном при следующем соотношении основных параметров (рисунок 13):

- соотношение диаметра (D) и длины (L) рабочего пространства печи: $D/L = 0,55-0,65$;
- соотношение длины цилиндрической ($L_{ц}$) и конечной части ($L_{к}$): $L_{ц}/L_{к}=2-2,5$;
- 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);
- задняя стенка печи должна иметь форму сферы (выполняется по шаблону) с радиусом (R), примерно равным диаметру цилиндрической части печи (D).

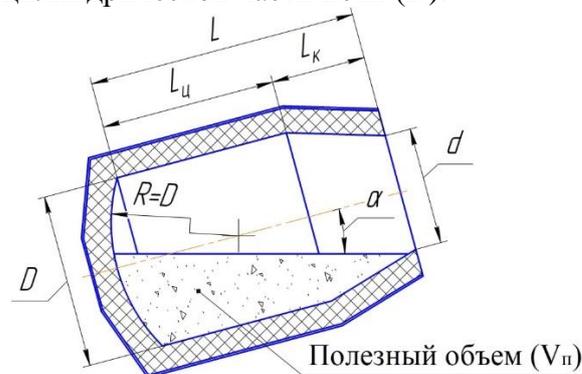


Рисунок 13. Геометрия рабочего пространства ротационной наклоняющейся печи

Привод наклона печи должен обеспечивать следующие пределы качания корпуса: в рабочем положении ось вращения должна находиться под углом $\alpha = (12-18)^\circ$ к горизонту, в положении слива расплава и скачивания шлака печь должна быть наклонена под углом $\alpha = -(20-35)^\circ$.

Горелка должна располагаться в нижней четверти крышки печи, противоположной направлению вращения корпуса. Ось горелочного устройства должна находиться под углом $\alpha = (7-10)^\circ$ к поверхности материала. Учитывая, что в процессе нагрева наклон поверхности материала изменяется, в печах, разработанных УП «Технолит», предусмотрена возможность регулировки положения горелки и управления, таким образом, направлением вектора газового потока (углом атаки) в зависимости от стадии процесса: нагрев и обработка материалов в твердой фазе, расплавление и проведение жидкофазных процессов. Длина факела при работе горелки на номинальной мощности должна составлять не менее L .

При оптимальной конструкции печи ее полезный объем (V_{II}) составляет $\sim 28-33\%$ 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 $\alpha = 1,05-1,10$ при разогреве 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 28-30 % O_2 в дутье).

4. Расчет основных элементов конструкции РНП

Расчет привода печи. При вращении ротационной печи мощность привода вращения (N) расходуется в первую очередь на полезную работу – подъем материала на определенную высоту, выше которой слой разрушается, и на преодоление сил внутреннего трения при перемешивании материала, а также – на преодоление «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 торца корпуса печи о крышку.

Обрабатываемый материал (шихта) в печи располагается несимметрично, вызывая постоянно действующий и направленный в сторону противоположную вращению печи момент веса материала (G_M). Плечом этой силы является расстояние от центра тяжести материала до вертикали, проходящей через ось вращения печи (рисунок 14).

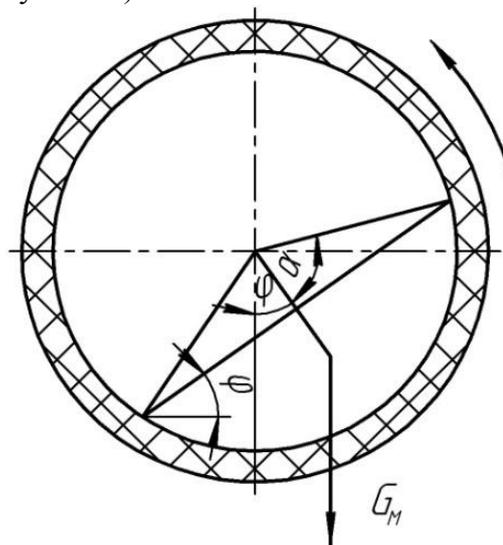


Рисунок 14. Схема расположения материала в печи

Следовательно, мощность (N_1), необходимая для преодоления момента веса материала, равна:

$$N_1 = \frac{G_M v_0}{102}, \text{ кВт} \quad (13)$$

$$N_1 = \frac{F_M L \rho_M v_0}{102}, \text{ кВт} \quad (14)$$

где F_M – площадь сечения (кругового сегмента), занятого материалом, m^2 ;

L – длина корпуса или его части одного диаметра, m ;

ρ_M – насыпная плотность материала, $кг/м^3$;

v_0 – линейная скорость центра тяжести площади сечения материала, $м/с$.

Так как площадь сечения материала в печи по форме близка к круговому сег-

менту, то линейная скорость его центра тяжести при вращении печи может быть представлена выражением [4]:

$$v_0 = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{св}^3 \sin^3 \alpha}{k_3 \cdot \pi \cdot R_{св}^2} \cdot \sin \varphi, \text{ м/с} \quad (15)$$

Для чугунной стружки и окалины угол α в зависимости от исходного содержания влаги, масел и СОЖ может составлять от 55 до 70°.

При нагреве материала его вес уменьшается за счет потери влаги, органических примесей и т.п. При этом, как правило, снижается внешнее и внутреннее трение, соответственно, уменьшается угол подъема материала (φ) и угол α , центр тяжести слоя стремится к вертикальной оси, а момент веса к нулю, для расчета мощности привода целесообразно использовать начальные характеристики загружаемых в печь материалов:

1) коэффициент заполнения материалом (k_3) для РНП при ее наклоне к горизонту, равном 12° составляет 0,28, при наклоне 15° – $k_3 = 0,33$;

2) средняя насыпная плотность материала (ρ_m) для чугунной стружки ~ 1600 кг/м³, для окалины ~ 2000 кг/м³;

3) угол естественного откоса в исходном состоянии для окалины и чугунной стружки ~ 38-43°, угол подъема (φ) при вращении футерованной печи со скоростью 1-3 об/мин. – 45-55°.

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 (N_2), необходимая для преодоления трения в подшипниках роликов и бандажей о ролики, может быть найдена из уравнения:

$$N_2 = \frac{P_{тр} v_{ц}}{102}, \text{ кВт} \quad (16)$$

Сила трения ($P_{тр}$) и окружная скорость цапф ($v_{ц}$) соответственно равны:

$$P_{тр} = 1000 f G / \cos 30^\circ = 1160 f G \quad (17)$$

и

$$v_{ц} = \frac{\pi r_{ц} n}{30} \cdot \frac{D_б}{D_p} \quad (18)$$

где f – коэффициент скольжения между цапфами роликов и вкладышами подшипников; $r_{ц}$ – радиус цапф роликов, м; n – число оборотов печи в минуту; $D_б$ – диаметр бандажей, м; D_p – диаметр опорных роликов, м; G – общий вес вращающейся части печи, тонн-сил.

Потери на преодоление трения в приводном механизме и уплотнительных устройствах учитываются при указании КПД механизма. 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 [4].

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 суммой результатов, найденных из выражений 13 и 16:

$$N = 1,25(N_1 + N_2) \quad (19)$$

Наблюдения за работой вращающихся печей показывают, что мощность, потребляемая ими (или нагрузка на привод), с увеличением срока эксплуатации значительно возрастает. Поэтому не будет ошибкой принять двукратный запас мощности при выборе привода.

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 испытывают подбандажные обечайки и днище печи. Ошибки в расчете корпуса и его деформирование ведет к разрушению футеровки и остановке печи.

Учитывая сложный переменный во времени разнонаправленный характер действующих нагрузок, расчет корпуса на

прочность и жесткость носит приближенный характер и осуществляется, 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 потому, 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, при котором приведенные нормальные напряжения могут быть определены по уравнению:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \quad (20)$$

где σ_1 – нормальные кольцевые напряжения, вызываемые продольно направленными моментами; σ_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 (σ_{-1}), вычисляемый по уравнению:

$$\sigma_{np} < \sigma_{-1} = 0,4\sigma_{вр}, \quad (21)$$

где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление, для углеродистых сталей $\sigma_{вр} = 360 \div 460$ МПа.

При расчете корпуса РНП, особенно печей большой емкости, следует принимать во внимание следующие моменты:

- стальные листы, применяемые для изготовления корпуса, сначала вальцуются в холодном состоянии, затем свариваются в отдельные обечайки, которые тоже 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 из-за неизбежных неточностей монтажа вращение корпуса не протекает плавно, а сопровождается вибрациями и биениями;

- 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 вынужденную остановку всей печи, приводят к преждевременному разрушению футеровки и потерям тепла.

Учитывая выше перечисленное, коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше четырех [4].

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 корпуса и его окружности. На корпус действуют также сосредоточенные нагрузки – это вес зубчатого венца и бандажа. Вес загруженного в печь материала вплоть до его перехода в жидкую фазу (расплавления), вносит динамическую составляющую в испытываемые корпусом нагрузки.

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

Под действием перечисленных внешних нагрузок в поперечных сечениях корпуса возникают продольно направленные

опорные и межопорные изгибающие моменты.

Опорные изгибающие моменты корпуса могут быть определены при помощи уравнения трех моментов или методом последовательных приближений.

Расчет стойки поворотной. Конструктивной особенностью РНП является относительно большой диаметр горловины печи, и соответственно большой вес футерованной крышки. Учитывая это стойка, удерживающая крышку, испытывает значительные изгибающие моменты, статические и динамические нагрузки, особенно в печах большой емкости (рисунок 15). Так в РНП полезной емкостью 3,75 м³ диаметр поворотной крышки составляет около 2 м, а вес с учетом футеровки и навесного оборудования превышает 3т, при этом изгибающий момент, действующий на опорную стойку, достигает 85000 Н·м.

Прочностной расчет и оптимизация конструкции стойки поворотной крышки были выполнены с помощью программного комплекса SolidWorks Premium: построены эпюры напряжений, перемещений, деформаций, запаса прочности. Наиболее нагруженным узлом является место стыковки оси стойки с опорным фланцем и зона установки верхнего радиального подшипника.

На рисунке 16 приведены результаты расчета нагрузки (максимальных напряжений) и запаса прочности, выполненного для различных вариантов конструкции стойки. При сохранении варианта, применяемого для печей меньшей емкости ($V_{П}=1-2$ м³), напряжения в узле достигают значения 1038 МПа, а запас прочности опускается ниже критического уровня ($n_{кр} = 1,5$) до 1,32 (рисунок 17.а). Установка в верхней части второго радиального подшипника позволила снизить максимальные напряжения в узле до 576 МПа и повысить запас прочности до 1,63 (рисунок 17.б). Для увеличения надежности работы узла в условиях реального производства был использован вариант с измененной конструкцией опорного фланца и увеличенным диаметром радиальных подшипников, который позволил снизить максимальные напряжения в узле до 335 МПа и обеспечил почти четырехкратное увеличение запаса прочности по сравнению с первым вариантом – до 4,67.

Использование методов компьютерного моделирования при конструировании новых видов оборудования позволяет существенно ускорить и повысить качество проектных работ, снизить риски и сократить затраты на освоение новой техники.

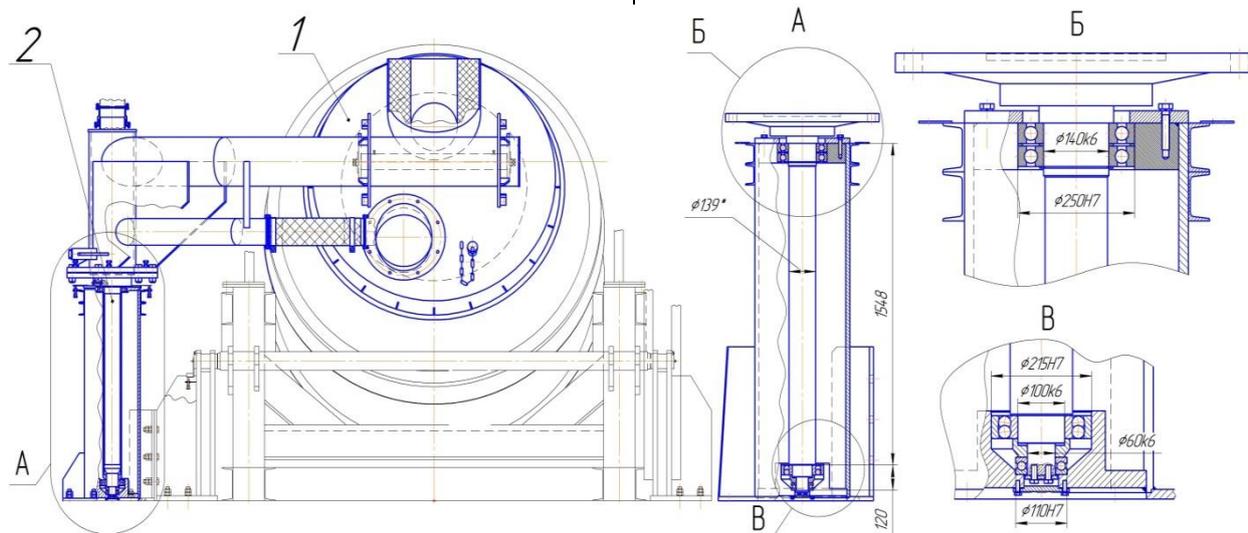


Рисунок 15. Поворотная крышка в сборе с опорной стойкой

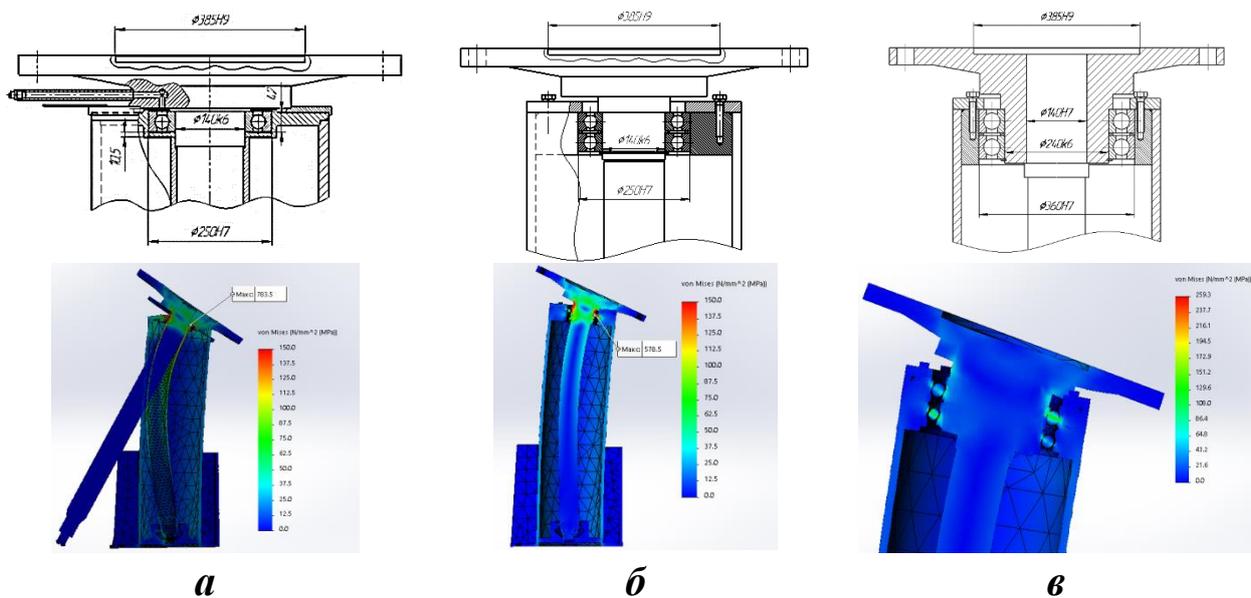


Рисунок 16. Оптимизация конструкции стойки крышки РНП:

а – традиционная конструкция – максимальные напряжения в узле 1038 МПа, коэффициент запаса прочности 1,32; *б* – узел улучшенной конструкции – максимальные напряжения в узле 578 МПа, коэффициент запаса прочности 1,63; *в* – узел, принятый к применению – максимальные напряжения 335 МПа, коэффициент запаса прочности 4,67.

Заключение

Выполнено комплексное исследование движения дисперсного материала и неизотермических газовых потоков в наклоняющихся ротационных печах (РНП). Получены новые данные об особенностях и закономерностях теплообменных процессов в ротационных печах. Установлено, что движение газов в РНП характеризуется сложным циркуляционным режимом. Циркуляции происходят в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Циркуляционные скорости более чем в 3-5 раз превышают поступательную скорость газового потока. Это явление приводит к интенсификации процессов теплообмена и соответственно массопереноса.

Характер движения газов в РНП и эффективность работы печи существенно зависят от скорости и направления (угла атаки) факела газовых горелок, а также от их расположения и параметров. РНП является тепловым агрегатом с возможностью управления вектором скорости потока газов, что позволяет в процессе плавки или нагрева, не меняя конструктивных параметров печи, в широких пределах изменять (регулировать) интенсивность технологических процессов.

Установлено, что материал в РНП совершает сложное винтовое возвратно-поступательное движение, перемешиваясь как в поперечном, так и в продольном сечении, что приводит к интенсивному конвективному переносу. Скорости движения частиц в пределах одного сечения отличаются в 100 и более раз и непостоянны во времени. Вращение слоя дисперсного материала превышает скорость вращения печи более чем в 3 раза.

Проведённое компьютерное моделирование позволило получить данные о скоростях и траекториях движения газовых потоков и материалов в РНП, а также о протекании тепло-массообменных процессов внутри агрегата. На основе полученных результатов определены параметры эффективной и экономичной работы ротационных наклоняющихся печей, разработаны рекомендации по их проектированию.

Найденные закономерности и разработанные технические решения прошли успешную апробацию при модернизации действующих и внедрении новых ротационных печей.

Библиографический список

1. Новичков С.Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных

- наклонных печах: дис. д-ра техн. наук / С.Б. Новичков. - Иркутск, 2008. - 348 с.
2. Тарасов А.В. и др. Metallургическая переработка вторичного свинцового сырья. – М.: Гинцветмет, 2003. – 224 с.
 3. Ровин С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. – Минск: БНТУ, 2015. – 382с.
 4. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология. – М.: Теплотехник, 2004. – 544с.
 5. Ровин Л.Е., Ровин С.Л. Классификация и свойства дисперсных металлоотходов//Литье и металлургия, 2015. – №2. – С.5–13.
 6. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических

процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240с.

7. Зобнин Б.Ф, Казяев М.Д., Китаев Б.И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей.– М.: Металлургия, 1982. – 360с.
8. Алямовский А.А. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 800с.
9. Sonavane Y., Specht E. Numerical Analysis of the heat transfer in the wall of rotary kiln using finite element method «ANSYS»: Germany, Magdeburg, 2009. – 186 p.



УДК 621.855

Н.С. Климов, В.Н. Трубников
 ФГБОУ ВО «Курская государственная
 сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова»
 г. Курск, Россия

E-mail kgsha.pma@mail.ru

С.А. Сергеев
 ОДПО фонд «Повышение
 квалификации и научных исследований»
 г. Курск, Россия

E-mail ssa-cib@yandex.ru

Дата поступления 13.05.2016

НАДЕЖНОСТЬ ЦЕПНЫХ МУФТ

Аннотация

Выявлены основные причины выхода из строя цепных муфт и сформулированы главные критерии их надежности. Указаны факторы, влияющие на работоспособное состояние цепных муфт, виды и характер износа их элементов. Описан один из главных критериев надежности цепных муфт – износостойкость основных элементов (цепи и звездочек). Разработана методика определения критерия нагруженности контакта. Установлена зависимость между увеличением среднего шага цепей, продолжительностью работы и критерием нагруженности муфты. Описаны виды и характер поломок элементов цепных муфт. Представлен метод расчета на прочность цепных муфт.

Ключевые слова: цепная муфта, надежность, работоспособность, износ, прочность.

Введение

Перед машиностроением стоят задачи значительного повышения качества промышленной продукции при непрерывном росте ее объема, а также создания новых конкурентоспособных образцов. Наиболее эффективным направлением в решении

этих задач является улучшение эксплуатационных показателей механизмов и машин. Уже на стадии проектирования новых машин должна быть обеспечена их надежность, исключено отрицательное влияние работы передаточных механизмов (в том