



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>
УДК 621.745

Поступила 11.11.2020
Received 11.11.2020

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РОТАЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

С. Л.РОВИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovinsl@mail.ru

Л. Е. РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,
г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы конструирования ротационных наклоняющихся плавильных печей (РНП), моделирования работы и расчета наиболее нагруженных узлов и элементов конструкции этих агрегатов. Представлены результаты разработки и анализ опыта эксплуатации РНП, используемых для переработки различных дисперсных материалов. Даны рекомендации по выбору оптимальных конструктивных решений для ротационных печей, предназначенных для рециклинга дисперсных металлоотходов.

Ключевые слова. Ротационные печи, конструкции, эксплуатация, прочность, надежность, дисперсные материалы, рециклинг, металлоотходы.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Конструктивные особенности ротационных печей / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 49–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>.

CONSTRUCTIVE FEATURES OF ROTARY FURNACES

S.L. ROVIN, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: rovinsl@mail.ru

L.E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj,
Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya Ave. E-mail: lerovin@mail.ru

The article deals with the design of rotary tilted melting furnaces (RTF), modeling of operation and calculation of the most loaded components and structural elements of these units. The results of the development and analysis of the operating experience of RTF used for processing various dispersed materials are presented. Recommendations for choosing optimal design solutions for rotary furnaces for recycling dispersed metal waste are given.

Keywords. Rotary furnaces, construction, operation, strength, reliability, dispersed materials, recycling, metal wastes.

For citation. Rovin S.L., Rovin L.E. Constructive features of rotary furnaces. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 49–59. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-49-59>.

Введение

Вращающиеся (ротационные) печи широко используются для сушки и термической обработки сыпучих дисперсных материалов в самых различных отраслях промышленности. Их популярность объясняется относительно невысокой стоимостью и низкой чувствительностью к размерам частиц обрабатываемого сырья. Хотя расход топлива в них на единицу готового продукта обычно выше, чем в шахтных печах или печах с псевдоожиженным слоем, но в отличие от указанных установок вращающиеся печи позволяют обрабатывать не только кусковые или монодисперсные, но и полидисперсные материалы с разбросом в размерах элементов в 2 порядка и более.

В конструктивном отношении традиционные вращающиеся печи отличаются, в основном, только размерами и устройством систем загрузки и выгрузки материалов. Основными элементами таких печей являются корпус, приводной механизм, опорные катки, а также загрузочная и разгрузочная камеры. Корпус, как правило, представляет собой сварной металлический цилиндр диаметром от 1 до 5 м и длиной до 200 м, футерованный изнутри огнеупорным теплоизолирующим материалом. Емкость печей составляет от сотен килограмм до десятков тонн. Горячие газы (продукты сжигания топлива) в таких агрегатах движутся линейно вдоль оси печи [1].

Для перемещения материала в печах непрерывного действия корпус обычно наклонен к горизонту под углом в 2–3°. Привод печи, с помощью которого она вращается со скоростью 1–10 об/мин, состоит

из электродвигателя, редуктора и зубчатой, цевьевой или цепной передачи. Причем крутящий момент передается непосредственно на корпус или на ось печи (в установках емкостью до 20 т).

Одно из важных направлений использования вращающихся печей – переработка дисперсных техногенных отходов, в том числе металлоотходов, что помимо нагрева предполагает и плавку материала.

Первые попытки применения вращающихся печей для плавки предпринимались еще в начале прошлого века. Для чего использовались так называемые короткобарабанные печи (КБП), имеющие относительно небольшую длину корпуса и отношение длины к диаметру (рис. 1). Наряду с возможностью ведения плавки на дисперсных и разнокусковых шихтовых материалах короткобарабанные печи имеют и ряд существенных недостатков: малое время контакта теплоносителя с шихтой и, как следствие, невысокий КПД (около 10–15 %); достаточно значительный унос высодисперсных фракций; неподвижная ось вращения и небольшой диаметр загрузочной горловины и соответственно трудности в загрузке шихты, скачивании шлака и выпуске металла. Причем указанные недостатки становятся тем заметнее, чем больше емкость печи и чем выше требуемые температуры плавления. В связи с этим область применения КБП ограничивалась, в основном, переплавкой вторичных медных, алюминиевых и более легкоплавких цветных сплавов.

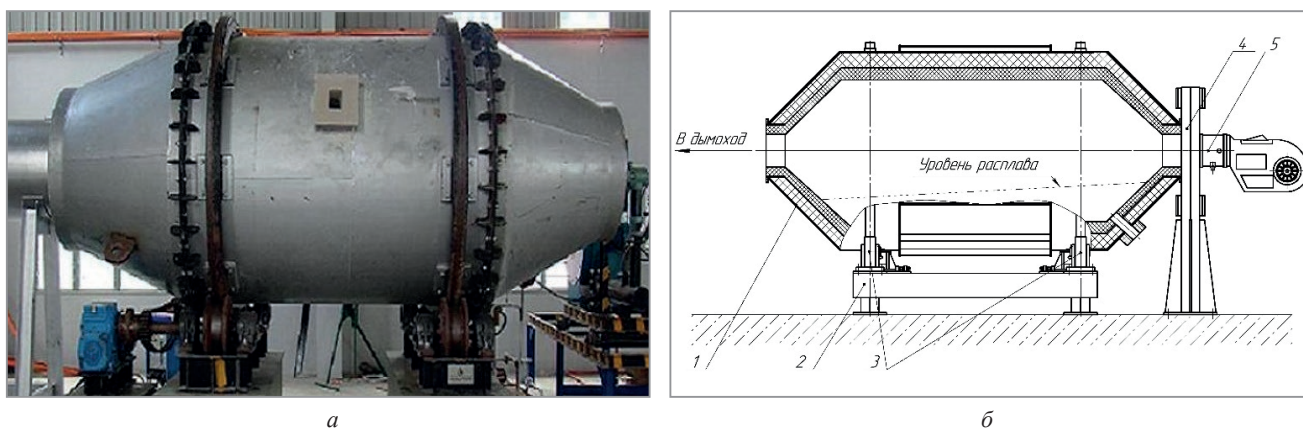


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) вращающейся короткобарабанной печи:

1 – футерованный корпус; 2 – рама опорная; 3 – катки приводные; 4 – поворотная стойка; 5 – горелка

Такое положение сохранялось до конца века, пока не были разработаны ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с петлеобразным движением газов, в которых ввод продуктов сжигания топлива и отвод газов из печи производится с одного и того же торца. В таких печах проблемы с загрузкой и сливом были сняты, теплоэффективность возросла вдвое, а при обогащении дутья кислородом появилась возможность плавить черные сплавы (рис. 2).

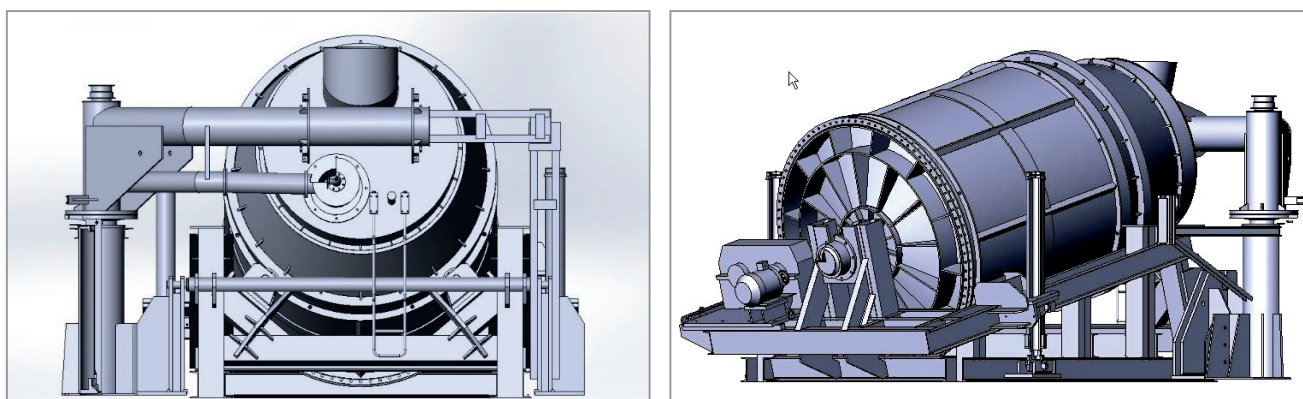


Рис. 2. Общий вид РНП полезной емкостью 3,75 м³

Для печей большой емкости может использоваться вариант с заменой привода вращения на привод качания, состоящий из двух электро- или гидроприводов, соединенных навстречу (рис. 3). Корпус печи при этом осуществляет 1–3 качания в минуту с поворотом на 180–210° – до максимального подъема загруженного дисперсного материала и соответственно предельного момента сопротивления повороту печи. Затем происходит переключение двигателей и изменение направления вращения приводит

к смещению слоя в противоположном направлении, обрушению и интенсивному перемешиванию материала. При качании активно используются силы инерции. Такая схема движения интенсифицирует перемешивание и позволяет снизить удельное энергопотребление на нагрев и расплавление материалов [2].

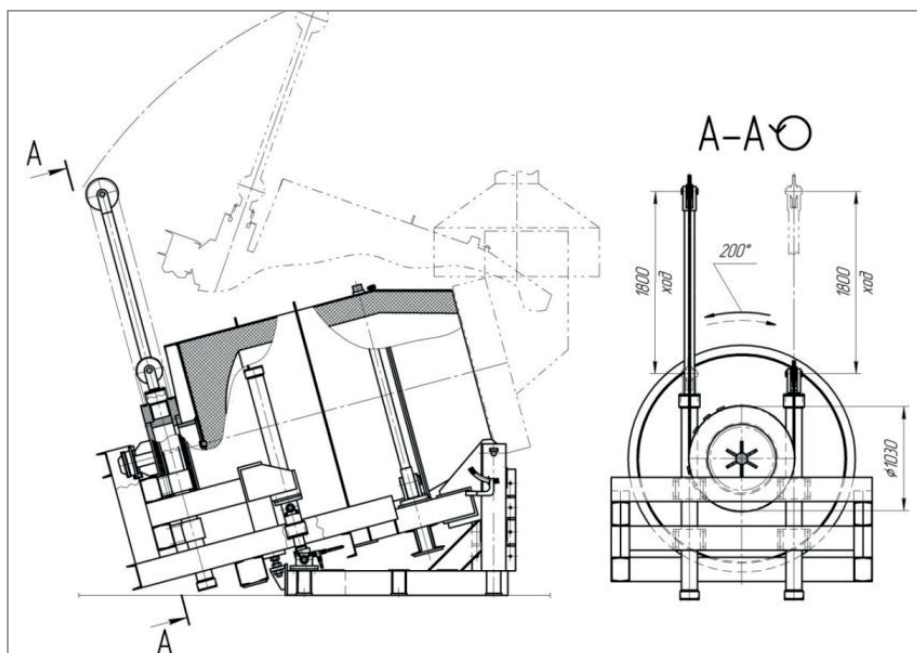


Рис. 3. Качающаяся наклоняющаяся печь (КНП)

Однако широкому распространению печей нового типа, имеющих принципиальные отличия от традиционных, препятствовала недостаточная изученность тепломассообменных процессов в рабочем пространстве РНП, практически полное отсутствие научно обоснованных рекомендаций по конструированию и расчету таких печей, как и рекомендаций по технологическим режимам ведения высокотемпературных процессов плавки черных сплавов.

Одними из первых в СНГ к разработке такого типа печей с начала века приступили белорусские специалисты – ученые БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого.

Результаты расчетов, моделирования и апробации

Оптимальные конструкции РНП обеспечивают существенные преимущества по сравнению с традиционными КБП: 2–3-кратное увеличение КПД и снижение удельного расхода топлива; сокращение в 1,5–2,0 раза трудоемкости и временных затрат на загрузку печи, удаление шлака и слив расплава и почти такое же увеличение производительности; ~ 2-кратная экономия флюсов и рафинирующих добавок при плавке алюминиевых сплавов [3]; значительное уменьшение уноса высокодисперсных фракций и выбросов пыли, соответственно снижение нагрузки на пылегазоочистные системы.

Движение газов в РНП характеризуется сложным петлеобразным циркуляционным режимом, что увеличивает время их пребывания в печи в 5–10 раз относительно КБП. Циркуляционные скорости газового потока и соответственно его скорости в зоне контакта с материалом в 5 раз и более превышают линейные скорости газов в КБП. Это обеспечивает значительную интенсификацию процессов тепломассообмена.

Конструкция РНП с рабочим положением корпуса под углом 15–20 ° к горизонту обеспечивает увеличение полезной емкости печи на 20–25 % и активное перемешивание шихты и расплава как в поперечном, так и в продольном сечении. Кроме того, такое положение корпуса позволяет существенно увеличить горловину печи, что, в свою очередь, обеспечивает минимальную трудоемкость и высокий темп завалки шихты, а возможность поворота печи горловиной вниз (на 20–30 °) – быстрый слив металла и шлака [4].

В РНП шлак перегрет и имеет высокую активность. Удельное количество энергии (плотность теплового потока), усваиваемое шихтой во время нагрева и расплавления, в РНП существенно выше, чем в индукционных и камерных стационарных печах отражательного типа. РНП позволяют вести интенсивное перемешивание, десульфурацию, дефосфорацию расплава, окислительные и восстановительные

процессы, а в случае необходимости – провести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Хотя наш опыт свидетельствует, что наиболее рационально все-таки вести доводку расплава по схеме дуплекс-процесса: РНП – канальная индукционная печь.

Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, в том числе отходах, например, отработанном масле. В качестве восстановителей могут использоваться любые углеродсодержащие материалы, в том числе отходы вплоть до лигнина. Для переработки железосодержащих отходов печи оборудуются газокислородными горелками или системой обогащения дутья кислородом до 27–30% O₂.

РНП наилучшим образом отвечают задаче переработки дисперсных влажных, загрязненных маслами и случайными неметаллическими примесями металлоотходов, причем позволяют осуществлять рециклинг таких отходов без их предварительной подготовки: очистки от влаги и масел, сушки, окомковывания, брикетирования и т. д.

Одним из наиболее нагруженных узлов РНП является привод, особенно в печах большой емкости (10 т и более). Наиболее рациональная схема привода РНП, как показала практика, состоит из двух контуров: электромеханического для вращения корпуса печи и гидравлического для наклона корпуса и поворота крышки.

При вращении правильно собранной и отбалансированной ротационной печи мощность привода (N) расходуется на подъем материала до определенного уровня, на преодоление сил трения при перемешивании материала, а также на преодоление так называемых «вредных» сопротивлений передачи: трение скольжения цапф опорных роликов и вкладышей подшипников, трение качения бандажей по опорным роликам, трение в приводном механизме, трение торца печи о крышку.

Обрабатываемый материал (шихта) при вращении ротационной печи смещается в сторону вращения и вызывает постоянно действующий в противоположном направлении момент силы веса G (рис. 4). Плечом этой силы является расстояние a от центра тяжести материала до вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения корпуса печи. Соответственно мощность, необходимая для подъема материала, равна:

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

где V – окружная скорость центра тяжести площади сечения материала, м/с.

В свою очередь, $V = k(wa)$, где k – коэффициент, учитывающий внешнее трение на границе «материал – футеровка» и внутреннее трение в слое; w – угловая скорость вращения печи, с⁻¹.

Смещение массы материала при вращении требует учета перераспределения нагрузки при расчете опорных роликов. В предельном случае масса материала полностью может лечь на один из роликов G_k .

При неправильно выбранном расстоянии между роликами, значительном внешнем и внутреннем трении в слое и завышенной скорости вращения корпус печи может оторваться от одного из роликов и «повернуться» вокруг оси нагруженного ролика в сторону, противоположную направлению вращения на угол ϵ , что может привести к сходу корпуса с опор (рис. 4). Чтобы этого не произошло, желательно устанавливать опорные ролики под центральным углом не менее 120°, хотя это увеличивает горизонтальную нагрузку на опорную часть ролика и требует периодической регулировки.

Для предотвращения продольного смещения корпуса печи при наклоне для слива металла и скачивания шлака необходимо предусматривать установку упоров или роликов-ловителей. Причем между боковой поверхностью обода и ловителями для предотвращения заклинивания должен оставаться зазор, компенсирующий тепловое расширение корпуса. Ловители рассчитываются на массу печи с полной загрузкой.

Важнейшее значение имеет правильное взаимное расположение опорных роликов и задней опоры печи. Перекосы и неравномерный износ неизбежно влекут за собой увеличение изгибающих моментов и напряжений в корпусе, износ подшипников и элементов привода и, как следствие, остановку печи.

Для повышения срока службы опорных станций и печи в целом все больше внимания уделяется

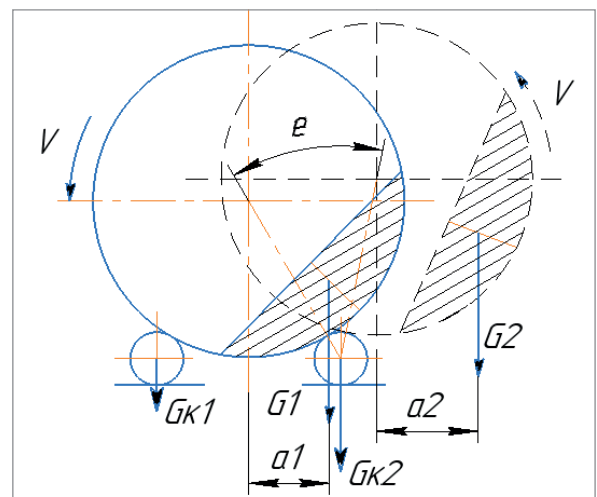


Рис. 4. Схема смещения центра тяжести слоя материала при вращении печи

разработке конструкций с контролируемой и регулируемой нагрузками на опорных роликах (рис. 5). Регулировка и компенсация нагрузки может осуществляться, например, с помощью регулируемых рессор-амортизаторов 2, на которые устанавливается рама 1 печи (рис. 5, а). Контроль нагрузки может быть реализован при помощи тензометрических датчиков 3, устанавливаемых между опорным роликом и рамой (рис. 5, б). Для регулировки нагрузки, воспринимаемой опорной станцией, в некоторых конструкциях опорные ролики устанавливают на направляющие, что позволяет приближать их друг к другу или раздвигать перемещением упорных гаек, расположенных на тягах 4 (рис. 5, в). В печах большой емкости некоторые фирмы изменяют конструкцию рамы и устанавливают опорные ролики по нормали к оси нагрузки (рис. 5, г).

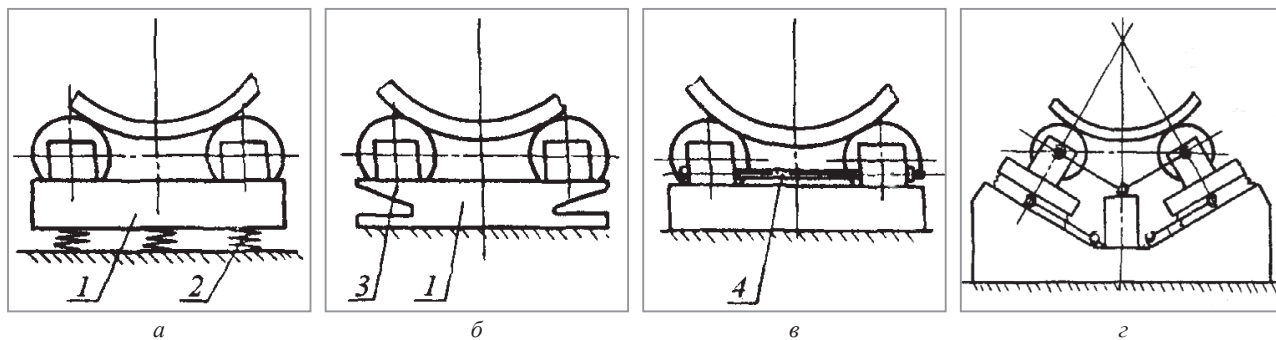


Рис. 5. Схемы установки опорных роликов в ротационных печах

При выполнении расчета мощности привода РНП необходимо учитывать начальные характеристики загружаемых в печь материалов (насыпную плотность, адгезию по отношению к футеровке, угол естественного откоса и внутреннее трение, связанные с дисперсностью, однородностью, формой частиц, влажностью и загрязненностью материала маслами и СОЖ), скорость вращения корпуса, коэффициент заполнения печи материалом. Коэффициент заполнения, или отношение полезного объема к полному объему рабочего пространства печи, в РНП связан с углом ее наклона к горизонту: при наклоне, равном 12° , коэффициент заполнения составляет 0,28; при наклоне 15° – 0,32. Насыпная плотность чугушной стружки – $\sim 1,6$ – $1,8$ т/м³, стальной – $\sim 1,3$ – $1,5$, мелкого скрапа – $\sim 2,0$ – $2,4$, окалины – $\sim 2,0$ т/м³. Угол естественного откоса в исходном состоянии для окалины и чугушной стружки составляет около 38 – 43° . С углом естественного откоса и угловой скоростью печи связан угол подъема материала φ в процессе вращения (отклонение центра тяжести слоя от вертикальной оси): при вращении футерованной шамотом печи со скоростью 2–3 об/мин угол подъема окалины и чугушной стружки составляет 50 – 55° . По мере нагрева адгезионные свойства материала и его внутреннее трение уменьшаются, что сопровождается уменьшением угла подъема и дисбаланса в работе печи [2].

Величина КПД привода установки зависит от типа и конструкции приводного механизма, правильности его монтажа и эксплуатации: для механизма закрытого типа КПД привода может быть принят равным 0,9; для смешанного типа – 0,85; для открытого – 0,8, что учитывается путем введения поправочного коэффициента при расчете мощности [1].

Работа вращающихся плавильных печей сопровождается значительными пульсациями динамических нагрузок как в процессе нагрева шихтовых материалов при обрушении неоднородного слоя, так и после расплавления при возникновении волн жидкого металла. Поэтому не будет ошибкой при выборе привода предусмотреть двукратный запас мощности.

Так же как привод, корпус ротационной печи испытывает значительные знакопеременные динамические нагрузки, продольные и поперечные изгибающие моменты, деформации сжатия и растяжения, а также нагрузки, вызванные тепловыми расширениями. Наряду с опорными роликами наиболее нагруженным узлом РНП является задняя осевая опора корпуса. Деформирование корпуса или днища печи ведет к резкому возрастанию нагрузки на заднюю ось и привод при осевом расположении ведущей шестерни вплоть до заклинивания и остановки. В связи с этим при конструировании особое внимание необходимо уделять обеспечению требуемой жесткости корпуса и днища печи: усиление цилиндрической части и днища ребрами жесткости, переход от плоского днища к днищу в виде усеченного конуса, от сварного к литому. Для печей емкостью более 2 т целесообразно от осевого привода переходить к приводу с подводом усилия непосредственно на обод печи с помощью цепной, цевьевой или зубчатой передачи.

Насколько актуальным является данное условие, можно судить по степени износа опорной оси (рис. 6). Деталь снята после месяца эксплуатации с 15-тонной печи. Износ вызван неточностями монтажа – нарушением соосности установки корпуса и задней опоры, что привело к биениям опорного подшипника, разрушению оси и остановке печи.

Для печей большого объема (15–20 т и более) можно рекомендовать применение двух идентичных спаренных приводов, работающих на одну шестерню, установленную на ободу печи. За счет взаимного сглаживания пульсаций они способствуют плавности хода и предотвращают возникновение автоколебаний (рис. 7).

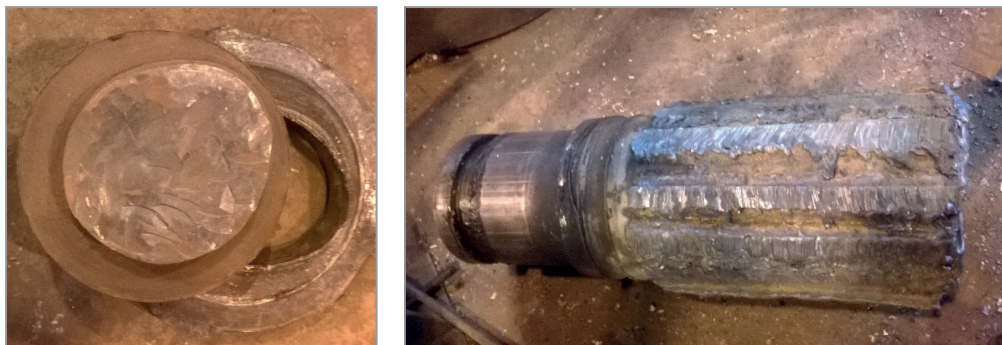


Рис. 6. Разрушение опорной оси 15-тонной РНП из-за несоосности корпуса и задней опоры

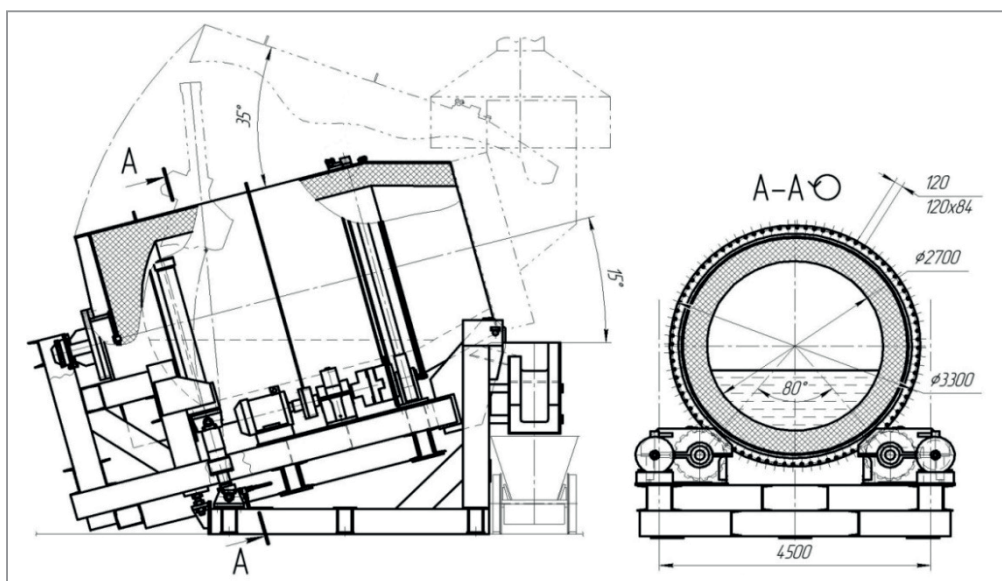


Рис. 7. РНП полезной емкостью 6,5 м³, оснащенная двумя приводами вращения

Учитывая, что толщина стенки корпуса ротационных печей значительно меньше $1/20$ радиуса кривизны его сечения, при расчете на прочность применима гипотеза двухосного напряженного состояния. При этом приведенные нормальные напряжения могут быть найдены по уравнению:

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

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 расчете конструкции корпуса целесообразно принимать предел выносливости – способность противостоять циклическим напряжениям. За предел выносливости принимают наибольшее (предельное) напряжение цикла, при котором не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклических нагружений. Для углеродистых сталей, применяемых для изготовления корпусов вращающихся печей, связь между пределом выносливости (σ_{-1}) и пределом прочности (временным сопротивлением $\sigma_{B.P.}$)

может быть представлена отношением: $\sigma_{\perp} \approx (0,4-0,5) \cdot \sigma_{В.р.}$. Временное сопротивление углеродистых сталей находится в пределах 3600–4600 кгс/см². Следовательно, предел выносливости, принимаемый к расчету, будет находиться в диапазоне 1450–1850 кгс/см².

При расчете корпуса ротационных печей, в том числе РНП, особенно большой емкости, следует принимать во внимание следующее [1]:

- действительное распределение нагрузок на отдельных участках корпуса из-за неточностей, допускаемых при его сборке, а также из-за неравномерного износа сопряженных деталей печи при ее эксплуатации, не может совпадать с их идеализированным распределением, определенным при расчете;
- при работе корпус печи находится под действием не только механических усилий, но и тепловых воздействий, меняющихся по своей интенсивности;
- в практических условиях недостижима точная центральная посадка зубчатого венца на корпус печи, поэтому вращение корпуса не протекает плавно, а сопровождается вибрациями (биениями), то же касается случая, когда используется цевьева передача;
- основная внешняя нагрузка, испытываемая корпусом, складывается из его собственной массы, массы футеровки и загруженного в печь материала;
- при работе печи находящийся в ней материал смещается в сторону вращения печи, поэтому и равнодействующая нагрузок на корпус смещена от вертикали, проходящей через ось вращения, что вносит динамическую составляющую в испытываемые корпусом нагрузки. Смещение центра тяжести слоя материала пропорционально адгезионным силам, которые уменьшаются в процессе нагрева, а после расплавления шихты снижаются почти до нуля;
- наибольшую нагрузку в ротационных наклоняющихся печах испытывает задняя опора, а наибольший изгибающий момент возникает в сечении, опирающемся на опорные ролики и в сечении перехода от цилиндрической к конической части корпуса.

Учитывая эти особенности, коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше 4.

Актуальной проблемой при эксплуатации наклоняющихся печей является уплотнение и герметизация щели между неподвижной крышкой и вращающимся корпусом печи. Выбывание газов определяется плотностью прилегания и точностью регулировки крепления крышки на торце печи. Однако при эксплуатации печи эта зона подвергается интенсивной продувке высокотемпературными газами, в щель попадают капли металла и шлака, возникают термические деформации. Все это приводит к нарушению плотности стыков и выбросу вредных газов (рис. 8).



Рис.8. Выбросы газов из РНП при неплотном прилегании крышки

Крышка РНП – это достаточно тяжелый узел, который, кроме собственной массы металлоконструкций и футеровки, несет горелку, трубопроводы, контрольную аппаратуру, кислородное копье, узлы крепления и регулировки. Неоднократно разработчиками предпринимались попытки создать надежную универсальную конструкцию уплотнения, однако практически проблема до сих пор не решена.

Одним из вариантов решения этой задачи может служить устройство (пневмомонок), разработанное для пилотной 1,5-тонной РНП (рис. 9). Крышка по контуру оборудуется воздушным коллектором и подвижным фланцем, прилегающим к фланцу корпуса печи. Фланец крышки при первоначальной установке поджимается к фланцу печи с помощью регулируемых пружин. Воздух под давлением, превышающим

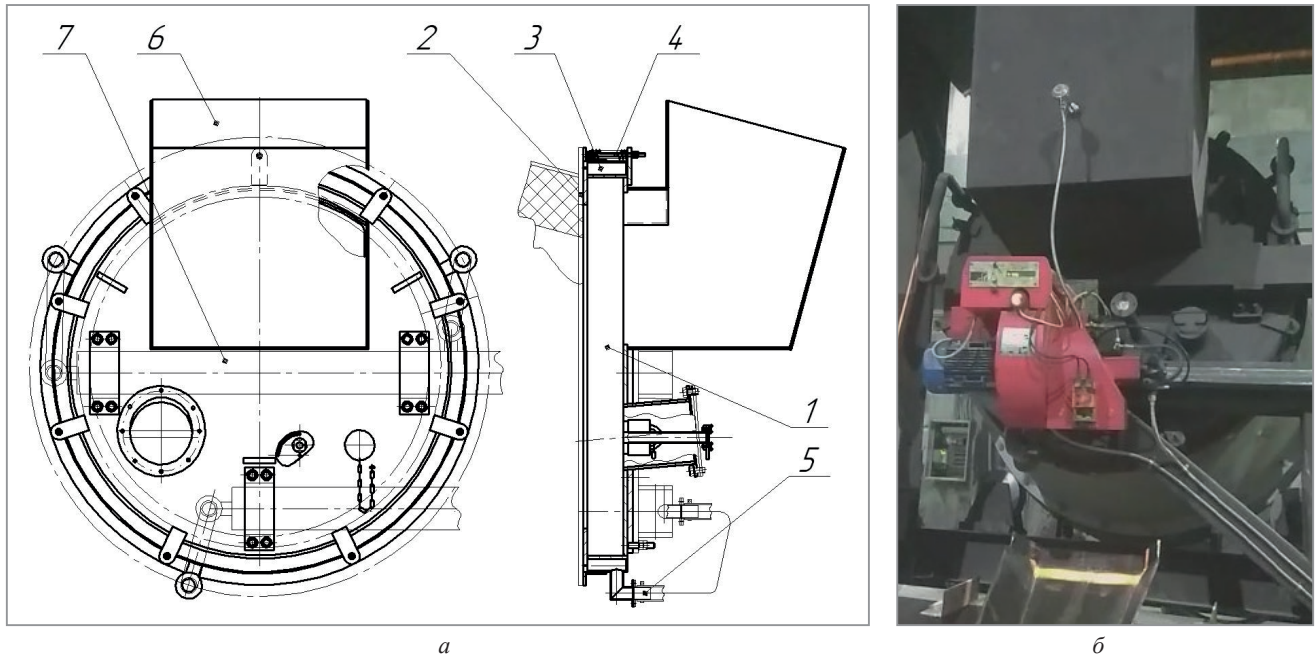


Рис. 9. Конструкция крышки, оснащенной пневмозамком (а), и пилотная РНП во время горячих испытаний (б):
 1 – крышка; 2 – фланец корпуса печи; 3 – воздушный коллектор; 4 – поджимные пружины;
 5 – подводящий патрубков; 6 – дымоход; 7 – консоль поворотной крышки

давление газов в печи, подается от вентилятора, установленного на колонне крышки, по полым консолям крепления в воздушный коллектор. Выходя из коллектора, воздух перекрывает зазор между фланцами и создает воздушную завесу на пути дымовых газов, стремящихся выйти из печи между крышкой и корпусом.

В печах большой емкости (10–15 т и более) значительные нагрузки испытывает также опорная стойка поворотной крышки. Масса поворотных частей крышки в таких печах превышает 3,0–3,5 т, а плечо центра тяжести относительно оси поворота составляет не менее 2,5–3,0 м. Помимо массы крышки и моментов, определяемых консольной конструкцией, стойка испытывает трудно прогнозируемые нагрузки от инерционных сил, толчков и неравномерного нагрева, что при сохранении традиционной конструкции может привести к ее перекосу и разрыву, несмотря на принятый 2-кратный запас прочности. Традиционная конструкция поворотной стойки показана на рис. 10.

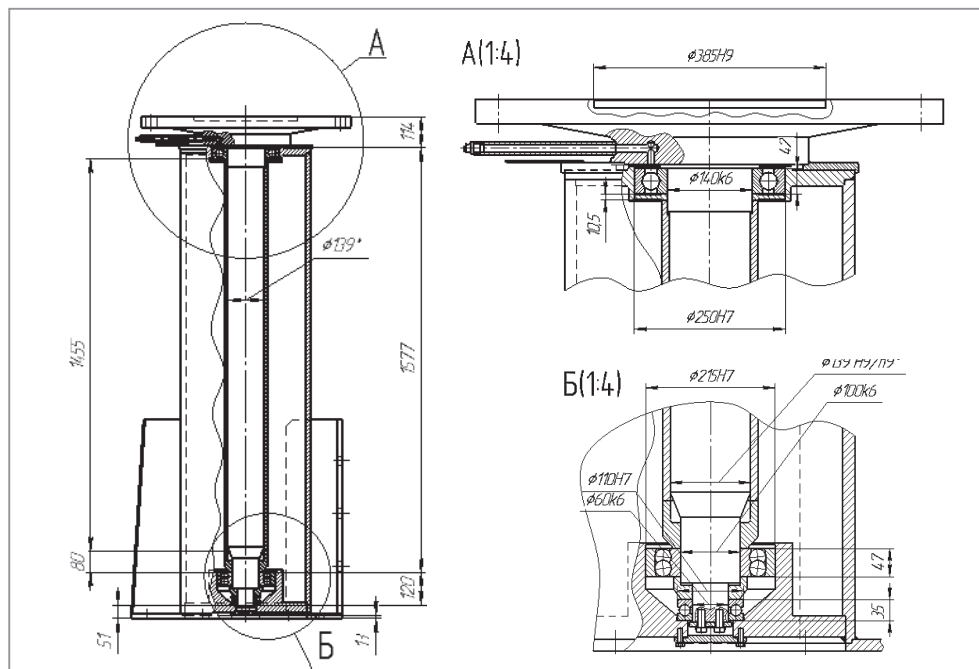


Рис. 10. Традиционная конструкция стойки крышки РНП

Для проверки конструкции на прочность и поиска оптимальных решений использовали модуль инженерного анализа Simulation известного программного комплекса SolidWorks Premium 2016, позволяющий моделировать сложнапряженное состояние деталей, сборочных узлов и механизмов, строить эпюры напряжений и деформаций, оценивать их надежность и запас прочности [5]. Исследование проводили путем h -адаптивного метода с целевой точностью 99%.

При компьютерном моделировании было установлено, что основные нагрузки воспринимает верхний подшипниковый узел, который не считался ранее самым нагруженным (рис. 11).

Поиск оптимальных решений позволил разработать узел, который при сохранении общей металлоемкости конструкции обеспечил снижение напряжений в наиболее нагруженных точках в 5–10 раз (рис. 12).

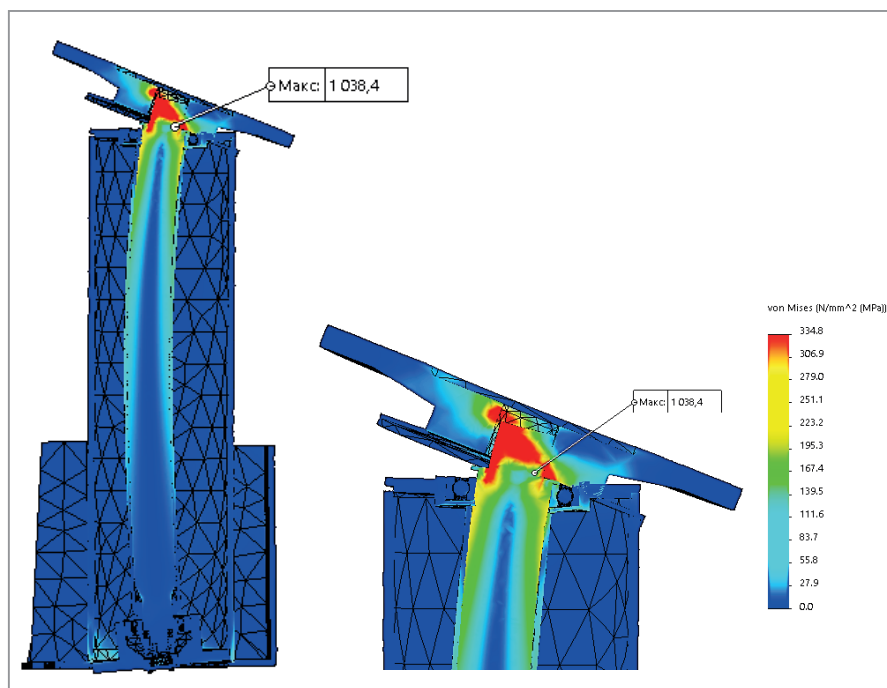


Рис. 11. Эпюры напряжений в стойке крышки традиционной конструкции

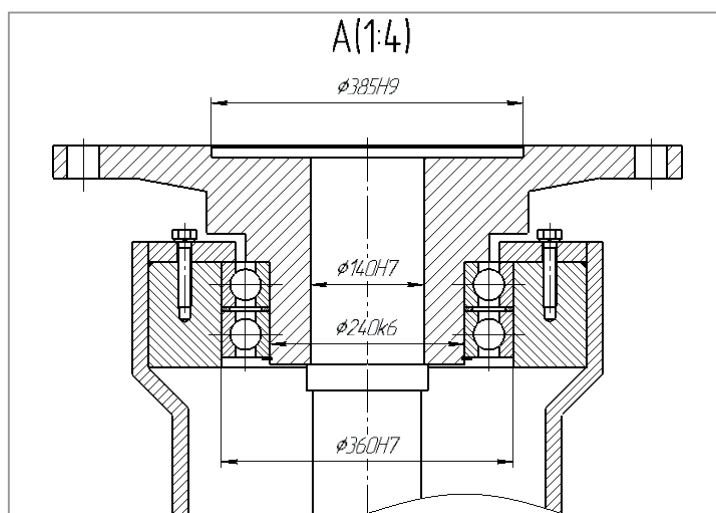


Рис. 12. Новая конструкция опорной части стойки крышки РНП

При использовании инновационной конструкции стойки крышки напряжения по критерию Мизеса уменьшаются в 4,4 раза по сравнению с первоначальной конструкцией, а минимальный запас прочности возрастает на порядок (рис. 13). Полученные результаты полностью удовлетворяют требованиям эксплуатации РНП. Разработанная на их основе конструкция была изготовлена и успешно внедрена на производстве в составе 15-тонной РНП для получения черного свинца из аккумуляторного лома на предприятии «КПВР «Сплав» (г. Рязань, РФ).

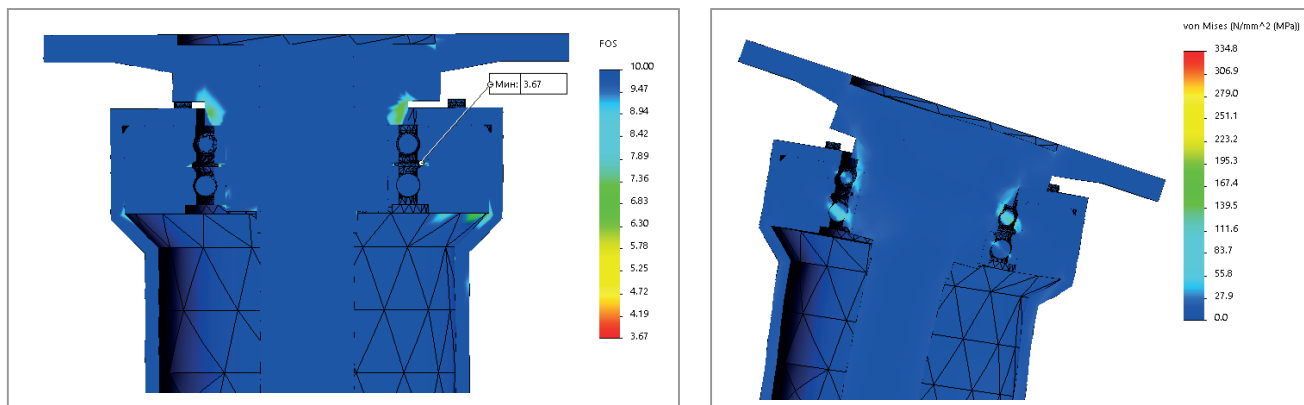


Рис.13. Эпюры напряжений в стойке крышки повышенной прочности.

Важнейшим элементом, обеспечивающим эффективную работу печи, является, конечно, горелочное устройство. РНП оснащаются жидкотопливными, газоздушными и газокислородными горелками, инжекционными, двухпроводными и блочными. Выбор горелки определяется требуемой емкостью, производительностью и назначением печи. На печи большой емкости, как правило, устанавливаются двухпроводные или блочные горелки. Ротационные печи для плавки черных сплавов или рециклинга железосодержащих отходов должны быть оборудованы газокислородными горелками или системой обогащения воздушного дутья. Как показывает практика, если речь идет о рециклинге оксидных и многокомпонентных отходов, то наиболее рациональным решением является подача кислорода непосредственно в рабочее пространство печи (под факел), что расширяет технологические возможности при восстановительных плавках.

Уже первые промышленные испытания, а затем и компьютерное моделирование показали, что ротационные наклоняющиеся печи в отличие от обычных вращающихся печей с линейной траекторией движения газов являются агрегатами, позволяющими активно управлять вектором газового потока и движением дисперсного материала в рабочем пространстве печи, что обеспечивает возможность изменять интенсивность тепло- и массообменных процессов, обеспечивая гибкость технологии плавки и рециклинга в целом.

Характер движения газов в печах РНП значительно отличается от традиционных представлений. Течение газов носит сложный циркуляционный, вихревой характер и определение «петлеобразное» движение далеко не исчерпывает его особенностей. Газовый поток в рабочем пространстве РНП совершает вращение со скоростью, превышающей его поступательную скорость в 5–6 раз (до 30 м/с) и зависящей от входной скорости газов, температуры и начального направления (вектора) факела продуктов сжигания топлива. Кроме того, формирование потока зависит также от скорости вращения и конфигурации динамического слоя материала в печи. Циркуляции газового потока происходят и в вертикальной, и в горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления вращения [6].

Важное значение имеет не только выбор тепловой мощности горелки, но и длина факела, место ее расположения и угол атаки (угол наклона оси горелки относительно поверхности материала при вращении печи).

Оптимальным местом расположения горелки служит нижняя четверть крышки, противоположная направлению вращения корпуса. Для крупных печей (емкостью более 15 т) эффективным вариантом является установка двух горелок вместо одной, имеющей суммарную мощность. Пламя от двух горелок охватывает большую площадь поверхности шихты, чем во всех других вариантах, соответственно обеспечивается передача большего количества тепла и равномерное распределение температурных полей по поверхности материала, что в совокупности с постоянным перемешиванием слоя вызывает более высокий темп его прогрева. Наиболее эффективный нагрев поверхности материала (настильность пламени) происходит, если угол атаки составляет 7–9 °.

РНП, предназначенные для переработки оксидных металлоотходов, должны быть оснащены газогорелочными устройствами с возможностью регулирования коэффициента соотношения «газ-воздух» (α) в пределах от 1,05–1,15 при разогреве печи и шихтовых материалов до 0,6–0,7 при проведении восстановительных процессов.

Высокие скорости вращения газового потока в РНП создают циклонный эффект, благодаря которому вынос из печи высокодисперсных материалов снижается более чем в 2 раза, что значительно расширяет возможности их использования относительно традиционных КБП.

Выводы

Разработанные технологии и оборудование прошли успешную апробацию на ряде машиностроительных и металлургических предприятий в Беларуси и России. РНП открывают реальную возможность создания экологичного, безотходного оборота металлов в промышленности. Только в масштабах Беларуси рециклинг образующихся металлоотходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали. Расчетная рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлосодержащих отходов составляет не менее 50%, а возврат инвестиций – не более 12–18 месяцев. Производственная мощность таких участков может варьироваться от 0,5–1,0 до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко, В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 2004. 554 с.
2. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
3. Новичков, С. Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2008. 348 с.
4. Шмитц, К. Рециклинг алюминия: основы технологий, механическая подготовка, металлургические процессы, проектирование завода / К. Шмитц, Й. Домагала, П. Хааг. М.: Алюсил МВит, 2008. 509 с.
5. SolidWorks Simulation Premium. Расчет на прочность конструкций (деталей и сборок) в упругой зоне; расчет конструкции на устойчивость, усталостные расчёты. – Режим доступа: www.3ds.com. Дата обращения: 15 октября 2018.
6. Ровин, С. Л. Движение газов в ротационных наклоняющихся печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов // Литье и металлургия. 2016. № 3. С. 11–19.

REFERENCES

1. Lisienko V.G., Shhelokov Ja. M., Ladygichev M.G. *Vrashhajushhiesja pechi: teplotehnika, upravlenie, jekologija* [Rotary kilns: heat engineering, control, ecology Moscow, Teplotehnik Publ., 2004, 554 p.
2. Rovin S.L. *Recikling metallothodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
3. Novichkov S.B. *Teorija i praktika pererabotki othodov aljuminija v rotornyh naklonnyh pechah* [Theory and practice of processing aluminum waste in rotary inclined furnaces. Dr.techn.sci.diss]. Irkutsk, 2008, 348 p.
4. Shmitc K., Domagala J., Haag P. *Recikling aljuminija: osnovy tehnologij, mehanicheskaja podgotovka, metallurgicheskie processy, proektirovanie zavoda* [Aluminum recycling: technology fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processes, plant design]. Moscow, Aljusil MVit Publ., 2008, 509 p.
5. SolidWorks Simulation Premium [Strength analysis of structures (parts and assemblies) in the elastic zone; structural analysis for stability, fatigue calculations]. www.3ds.com.
6. Rovin S.L., Rovin L.E., Zharanov V.A. *Dvizhenie gazov v rotacionnyh naklonjajushhihsja pechah* [Gas movement in rotary tilt ovens], *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 11–19.