



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-72-81>
УДК 671.24

Поступила 15.04.2024
Received 15.04.2024

ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАМЕННО-ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТРУЖКИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В УСТАНОВКАХ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ

О. М. ДЬЯКОНОВ, В. Ю. СЕРЕДА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: deaconco@mail.ru

В результате проведенного исследования пламенно-индукционного нагрева стальной и чугуновой стружки установлены оптимальные режимы нагрева, габариты печи и соотношение размеров ее составных частей (газопламенного и индукционного нагревателей), что послужило основой для разработки новой технологии нагрева, обеспечивающей по сравнению с известными аналогами минимизацию размеров, повышение производительности и КПД печи. Установлено, что на этапе испарения и удаления из стружки паров воды и легких фракций масла в интервале температур 100–550 °С до момента достижения оптимальной концентрации масла 1,5–3,0% среди всех известных способов муфельного нагрева наиболее экономичным и производительным является газопламенный нагрев, а в дальнейшем при нагреве обезвоженной пористой массы металла плотностью 1100–1700 кг/м³ до 850 °С – индукционный нагрев в атмосфере продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ. Индукционный нагрев целесообразно проводить с частотой тока 2,0–2,4 кГц при соотношении протяженности зон газопламенного и индукционного нагрева 2,0–2,5 и размеров индуктора (высоты к диаметру отверстия) 3,7–4,0. Степень окисленности горячепрессованных брикетов соответствует исходному содержанию кислорода в стружке: у стальной – 1,3–1,7%, чугуновой – 0,46–0,47%. Полученные данные позволили разработать технологию пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов, а также конструкцию малогабаритной печи с удельной производительностью 6500–9500 кг/(м²·ч) и КПД 40–45%.

Ключевые слова. Стружка черных металлов, горячее брикетирование, нагрев пламенно-индукционный, проходная муфельная печь, температура, защитная атмосфера, смазочно-охлаждающая жидкость, продукты термической возгонки, пиролиз, углеродное покрытие, брикет.

Для цитирования. Дьяконов, О. М. Технология пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов в установках горячего брикетирования / О. М. Дьяконов, В. Ю. Середа // *Литье и металлургия*. 2024. № 2. С. 72–81. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-72-81>.

TECHNOLOGY OF FLAME-INDUCTION HEATING OF FERROUS METAL SHAVINGS IN HOT BRIQUETTING INSTALLATIONS

О. М. DYAKONOV, V. Ju. SEREDA, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: deaconco@mail.ru

As a result of the study of flame-induction heating of steel and cast iron shavings, optimal heating modes, dimensions of the furnace and the ratio of the sizes of its components (gas-flame and induction heaters) were established, which served as the basis for the development of a new heating technology, which ensures minimization of dimensions in comparison with known analogues, increasing the productivity and efficiency of the furnace. It has been established that at the stage of evaporation and removal of water vapor and light oil fractions from the chips in the temperature range of 100–550 °C until the optimal oil concentration of 1.5–3.0% is achieved, among all known methods of muffle heating, gas-flame heating is the most economical and productive heating, and subsequently, when heating a dehydrated porous mass of metal with a density of 1100–1700 kg/m³ to 850 °C – induction heating in an atmosphere of products of thermal sublimation and destruction of coolant. It is advisable to carry out induction heating with a current frequency of 2.0–2.4 kHz with a ratio of the lengths of the gas-flame and induction heating zones of 2.0–2.5 and the dimensions of the inductor (height to hole diameter) of 3.7–4.0. The degree of oxidation of hot-pressed briquettes corresponds to the initial oxygen content in the chips: for steel – 1.3–1.7%, for cast iron – 0.46–0.47%. The data obtained made it possible to develop a technology for flame-induction heating of ferrous metal shavings, as well as the design of a small-sized furnace with a specific productivity of 6500–9500 kg/m²·h and an efficiency of 40–45%.

Keywords. Ferrous metal shavings, hot briquetting, flame-induction heating, continuous muffle furnace, temperature, protective atmosphere, cutting fluid, thermal sublimation products, pyrolysis, carbon coating, briquette.

For citation. Dyakonov O. M., Sereda V. Ju. Technology of flame-induction heating of ferrous metal shavings in hot briquetting installations. *Foundry production and metallurgy*. 2024, no. 2, pp. 72–81. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-2-72-81>.

Введение

Стружка черных металлов представляет собой вторичный ресурс современного литейного и металлургического производства, который в условиях непрерывного роста количества выпускаемой металлоемкой продукции в Республике Беларусь приобретает все большее значение. Горячее брикетирование стальной и чугунной стружки проводится с целью полного удаления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и получения металлургических брикетов, являющихся полноценными заменителями габаритного кускового лома, чушкового чугуна, литейно-шихтовых слитков. Переплавление стружки без предварительной подготовки или с применением холодного брикетирования, как это предлагается в [1–3], неприемлем по причине большого угара, насыщения металла газами и другими вредными примесями, повышенного расхода электроэнергии, кислорода и ферросплавов. Возгонка и сжигание масляного компонента СОЖ многократно увеличивают выбросы теплоты и вредных веществ в атмосферу, требуют частой замены фильтров очистных сооружений. Высокое содержание влаги является причиной быстрого окисления металла при хранении. Загрязненность стружки отработанными маслами приводит к загрязнению транспортного оборудования и железнодорожных магистралей.

Горячее брикетирование стружки позволяет произвести плавку брикетов на индукционных печах и других плавильных агрегатах при минимальном угаре металла с максимальным выходом годного литья, снизить себестоимость литья при полном соблюдении экологических норм и требований СТБ 2026–2010 [4].

Цель работы состоит в определении и оптимизации режимов нагрева стальной и чугунной стружки, а также установлении размеров пламенно-индукционной муфельной печи, что послужило бы основой для разработки новой технологии нагрева, обеспечивающей по сравнению с известными аналогами минимизацию размеров, повышение производительности и КПД печи.

Оборудование, методики и результаты экспериментального исследования

В [5–7] рассмотрена схема вертикальной проходной муфельной печи для пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов и приведены результаты теоретического анализа этого процесса. Установлено, что при площади проходного сечения муфеля $0,15 \times 0,45 = 0,0675 \text{ м}^2$, толщине прогреваемого слоя 0,15 м и мощности газовой горелки 20 нм³/ч оптимальная производительность печи составляет 500 кг/ч. Для полного удаления воды из стружки и повышения производительности требуется увеличение высоты зоны газопламенного нагрева до 2,3 м. К этому параметру необходимо добавить высоту конуса (чаши) 0,4 м – участка перехода стружки из муфеля газопламенного нагревателя в муфель индуктора, а также высоту муфеля индуктора. Для подтверждения расчетных данных нами проведено экспериментальное исследование процесса нагрева при тех же условиях.

Нагрев стружки осуществляли в стальном коробе с отверстиями для выхода паров СОЖ в камерной печи SNOL 165/1200 (AB Umega). В рабочем пространстве печи температуру короба поддерживали постоянной, равной 900 °С. Изменение температуры стружки и кинетику удаления СОЖ определяли методом поэтапного нагрева. Температурный интервал нагрева с учетом предварительного подогрева в загрузочном устройстве составлял 20–800 °С. Температуру печного пространства печи измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары, встроенной в корпус печи, температуру стружки – с помощью пирометра Кельвин-1000, энергозатраты – по счетчику электроэнергии. В процессе нагрева в ограниченном пространстве короба создавалась защитная углеводородная атмосфера в результате термической возгонки масляного компонента СОЖ. Кинетику удаления СОЖ во времени определяли периодическим взвешиванием, т. е. весовым методом. По полученным значениям времени нагрева производили расчет параметров промышленной печи при практически полной идентификации условий и режимов нагрева в коробе и муфеле промышленной печи: равенство температур рабочего пространства, толщины прогреваемого слоя стружки и площади отверстий для выхода паров СОЖ.

Для определения состава дымовых газов использовали газоанализатор типа ПЭМ-2М, предназначенный для измерения массовой концентрации оксида углерода (СО), оксида азота (NO), диоксида азота (NO₂), диоксида серы (SO₂), метана (CH₄), объемной доли кислорода (O₂), диоксида углерода (CO₂). Газоанализатор ПЭМ-2М представляет собой многоблочный многоканальный прибор непрерывного действия. Для измерения массовой концентрации оксида азота, оксида углерода, диоксида азота, диоксида серы, метана и объемной доли диоксида углерода применяли оптико-абсорбционный метод в инфракрасной области спектра; для измерения объемной доли кислорода – электрохимический метод с помощью выносного измерительного модуля.

Образование коксообразных углеродных отложений (результат пиролиза углеводородных соединений) подтверждено электронно-микроскопическими и рентгенографическими исследованиями на лазерном растровом микроскопе ЛРЭМ-150В (Япония) с рентгеновской приставкой, позволяющей проводить точечный качественно-количественный анализ на любых участках поверхности (площадь 2×2 мкм). Для исследования химического состава стружки использовали стандартные методики по ГОСТ 22536.1-88, ГОСТ 17745-90.

В таблице приведены экспериментальные данные, полученные методом поэтапного нагрева, на рис. 1 показаны зависимости температуры стружки и концентрации СОЖ от времени нагрева и расстояния, пройденного в печи при ее производительности 500 кг/ч.

Т а б л и ц а

Марка материала	Измеряемые параметры	Время, мин											
		0	5	10	15	20	25	26,8	31,1	35	40	45	46,5
Сталь 45	$T, ^\circ\text{C}$	90	163	226	279	360	458	487	550	628	692	743	750
	$C_w, \%$	7,0	3,6	2,0	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$C_o, \%$	3,0	2,9	2,5	2,4	2,3	1,9	1,8	1,1	0,8	0,4	0	0
	$C, \%$	10,0	6,5	4,5	3,4	2,3	1,9	1,8	1,1	0,8	0,4	0	0
Чугун СЧ25	$T, ^\circ\text{C}$	70	129	188	216	261	345	392	495	675	788	817	820
	$C_w, \%$	7,0	4,3	3,7	2,7	0,9	0	0	0	0	0	0	0
	$C_o, \%$	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,2	1,5	0,9	0	0	0
	$C, \%$	10,0	7,2	5,5	4,3	3,4	2,4	2,2	1,5	0,9	0	0	0

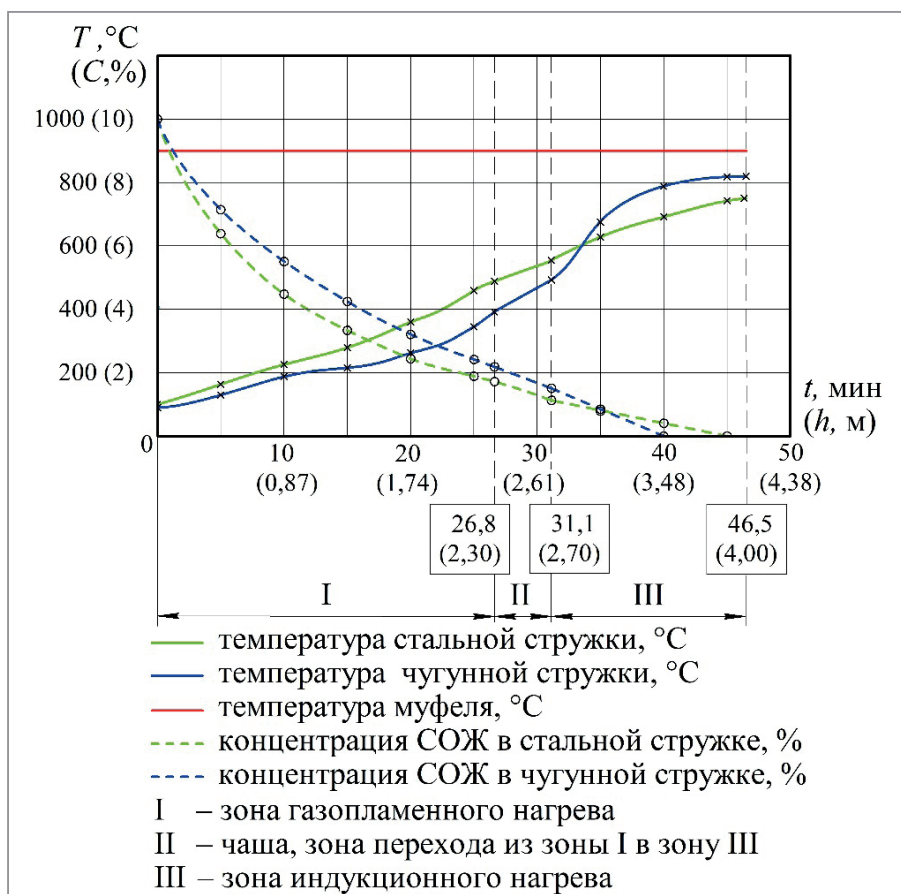


Рис. 1. Зависимость температуры стружки и концентрации СОЖ от времени нагрева и расстояния, пройденного в печи

Размеры короба – $150 \times 150 \times 450$ мм; плотность засыпки стальной стружки в короб – 900 кг/м^3 ; масса – 9,1 кг; плотность засыпки чугушной стружки – 1300 кг/м^3 , масса – 13,2 кг; исходное содержание СОЖ в стружке – $C = 10\%$ (вода – $C_w = 7\%$; масло И-20А – $C_o = 3\%$).

Процесс нагрева стружки в коробе в камерной электропечи имитировал процесс газопламенного нагрева в муфеле промышленной проходной печи (зона I). Из короба горячая стружка высыпалась в стальной муфель индуктора диаметром 300 мм и высотой 1300 мм (зона III) посредством конусной чаши высотой 400 мм (зона II).

Из таблицы и рисунка видно, что в зоне I интенсивность нагрева металла сдерживается процессами испарения воды и масла. В условиях ограниченного пространства в коробе образовавшийся газ продувает слой стружки под давлением, вытесняя воздух и создавая защитную углеводородную атмосферу, состав которой зависит от химического состава СОЖ. В состав газов входят угарный и углекислый газы, водород, углеводородные соединения, соединения азота, серы и фосфора, сажа и др. Избыточное давление и живучесть защитной атмосферы определяются величиной плотности газа, т.е. его необходимым и достаточным количеством в единице объема. Пары воды и масла выходят в топку печи через щелевые отверстия в крышке короба. При извлечении короба из печи, снятии крышки и засыпке горячей стружки в чашу и затем в муфель индуктора высвобождается значительное количество паров воды и масла. В муфеле индуктора стружка нагревается до конечной заданной температуры $800 \text{ }^\circ\text{C}$ с высокой интенсивностью, однако в конце процесса градиент роста температуры снижается в связи с действующим ограничением температуры муфеля $900 \text{ }^\circ\text{C}$. В конце процесса происходит выравнивание температур столба стружки в его поперечных сечениях от периферии к центру за счет теплопроводности. Масло удаляется в полном объеме. Погрешность расчетных значений температуры на всех этапах процесса нагрева по сравнению с экспериментальными данными не превышает 7%.

Характерно, что в коробе (зона I) тонкая сливная стальная стружка нагревается быстрее, чем чугушная стружка надлома, а в индукторе (зона III) наоборот, нагрев чугушной стружки протекает с большей интенсивностью. Объясняется это различием толщины частиц и насыпной плотности стальной и чугушной стружки. В индукторе плотность и масса засыпки чугушной стружки больше.

Индукционный нагрев стружки главным образом осуществляется за счет прямого контактного теплообмена со стенками горячего муфеля, а также радиационного и конвективного теплообмена с газами в пространстве муфеля, что особенно эффективно при нагреве парамагнитных и немагнитных материалов, входящих в состав металлургических композитов. Металлические частицы, помимо прямого контакта с нагретым муфелем, подвержены также электромагнитному воздействию. Эффективность индукционного нагрева повышается экспоненциально по мере удаления СОЖ и уплотнения стружки. С целью повышения эксплуатационной стойкости и во избежание скин-эффекта муфель индуктора целесообразно изготавливать из парамагнитной аустенитной жаропрочной стали 20Х23Н18. В этом случае в индукторе он будет нагреваться равномерно по всему объему.

Плотность паров масла в индукторе достигает своего наивысшего значения. При повышенных температурах интенсифицируется также процесс пиролиза углеводородных соединений. Углеродное покрытие защищает металл от окисления как в процессе нагрева, так и на выходе из печи, вплоть до получения и охлаждения брикета. Помимо защитных функций, оно выполняет роль эффективной смазки в процессе горячего прессования [4, с. 179–184].

КПД пламенно-индукционной печи рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{A_1 + A_2}{Q} = \eta_1 \frac{Q_1}{Q} + \eta_2 \frac{Q_2}{Q} = \eta_1 k_1 + \eta_2 k_2,$$

где A – полезная энергия, кДж; Q – полная энергия, затраченная на нагрев стружки, кДж; A_1, A_2 – полезная энергия, затраченная на нагрев стружки в зонах газопламенного и индукционного нагрева соответственно, кДж; Q_1, Q_2 – полная энергия, затраченная в этих зонах, кДж; η_1, η_2 – КПД печи в зонах газопламенного и индукционного нагрева соответственно; k_1, k_2 – доли в балансе энергозатрат газопламенного и индукционного нагрева.

Оптимальное соотношение протяженности зон газопламенного и индукционного нагрева (временных интервалов) определяли по достижении минимума энергозатрат. При этом выдерживали принцип предотвращения окисления частиц металла. Установлено, что доля энергозатрат в зонах газопламенного и индукционного нагрева находится в пределах $k_1 = 0,6\text{--}0,7$ и $k_2 = 0,3\text{--}0,4$. КПД печи в этих зонах $\eta_1 = 24\text{--}26\%$ и $\eta_2 = 70\text{--}75\%$. КПД печи в целом $\eta = 40\text{--}45\%$. При сгорании в топке масляного компонента СОЖ КПД печи возрастает пропорционально количеству сгоревшего масла.

По результатам теоретического и экспериментального исследований зависимости температуры нагрева стальной и чугунной стружки и КПД печи, а также процентного содержания и состава водоэмульсионной СОЖ от производительности печи и времени нагрева установлено, что на этапе испарения и удаления из стружки паров воды и легких фракций масла в интервале 100–550 °С до момента достижения оптимальной концентрации масла 1,5–3,0% среди всех известных способов нагрева наиболее экономичным и производительным является газопламенный нагрев. При нагреве обезвоженной пористой массы металла плотностью 1100–1700 кг/м³ до температуры 850 °С наиболее эффективен индукционный нагрев с частотой тока 2,0–2,4 кГц. Оптимальное соотношение протяженностей зон газопламенного и индукционного нагрева – 2,0–2,5, размеров индуктора (высоты к диаметру отверстия) – 3,7–4,0 удельной производительностью 6500–9500 кг/м²·ч.

По результатам экспериментального исследования влияния условий и режимов муфельного нагрева на формирование состава и свойств стальной и чугунной стружки установлено протекание процессов возврата и частичной рекристаллизации металла при температурах неполной горячей деформации 700–850 °С, сопровождаемых снижением прочностных характеристик металла в 6–7 раз, полной очисткой твердых частиц от масляных загрязнений и СОЖ. При плотности углеводородов и продуктов их распада в муфеле 15–25 кг/м³ металлические частицы стружки полностью защищены от окисления. Для поддержания избыточного давления в муфеле суммарная площадь щелевых отверстий в стенке муфельной трубы не должна превышать 3–5% площади ее поперечного проходного сечения. Степень окисленности горячепрессованных брикетов соответствует исходному содержанию кислорода в стружке: у стальной – 1,3–1,7%, чугунной – 0,46–0,47%.

Технология и оборудование пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов

С целью повышения производительности нами разработана конструкция малогабаритной печи с П-образным муфелем и тремя газовыми горелками (рис. 2). По сравнению с рассмотренным выше прямоугольным профилем (0,15×0,45 м) площадь проходного сечения муфеля увеличена в 2,3 раза при толщине прогреваемого слоя стружки 0,15 м. Производительность печи увеличена в 3 раза и составляет 1,5 т/ч.

Печь состоит из головки 5, газопламенного 6 и индукционного 7 нагревателей, муфель 8, 9, чаши 10, трех вертикальных шнеков 11, трех узлов газа 12 с тремя дутьевыми горелками 13 мощностью 20 нм³/ч каждая, затвора 14, труб 15 для отвода дымовых газов в установку мокрой очистки, обезвреживания и утилизации. Корпус печи изготовлен из стальных уголков и стального листа, выложен изнутри шамотным кирпичом, изолирован листовым асбестом.

Дробленая стружка (размер фракций до 20 мм) с помощью ковшового элеватора загружается в бункер 1. Горизонтальные шнековые питатели 2 подают стружку в головку 5 печи и сбрасывают ее в вертикальную П-образную муфельную трубу 8. Стружка перемещается в трубе под действием собственного веса, при этом шнеки 11 предотвращают ее зависание.

Процесс нагрева стружки делится на два этапа: предварительный нагрев в зоне газопламенного нагрева до 450–550 °С и окончательный нагрев в муфеле индуктора до температуры прессования 700–850 °С. На этапе предварительного нагрева вода из шихты удаляется в полном объеме, а масло (в основном его легкие фракции) – до 30%.

В муфеле газопламенного нагревателя продукты испарения СОЖ проходят через слой шихты как через постоянно обновляемый фильтр вплоть до их выпуска в топку печи через щелевые отверстия в стенках муфельной трубы. Термическое разложение, фильтрация газообразных продуктов сокращают общий объем газовыделений, упрощая задачу их обезвреживания и утилизации.

В пламени газовых горелок пары масла сгорают как дополнительное топливо совместно с природным газом. Сжигание масла интенсифицируется вдуванием в топку горячего воздуха. Масло обладает высокой теплотворной способностью, повышает КПД печи, снижает расход природного газа (до 30%) и, таким образом, в значительной степени способствует повышению экономической эффективности установки горячего брикетирования стружки.

Принятая U-образная схема перемещения дымовых газов улучшает условия теплообмена, способствует снижению перепада температур по высоте зоны газопламенного нагрева. В топке печи (800–1200 °С) образуется завеса перегретого пара в результате испарения водной составляющей СОЖ. Дымовые газы проходят эту завесу, взаимодействуя с активными молекулами пара, а также с молекулами кислорода горячего воздуха, вдуваемого в печь для сжигания паров масла, при этом газы очищаются от твердых частиц сажи и практически полностью вступают в реакцию окисления (дожигания) оксида углерода.

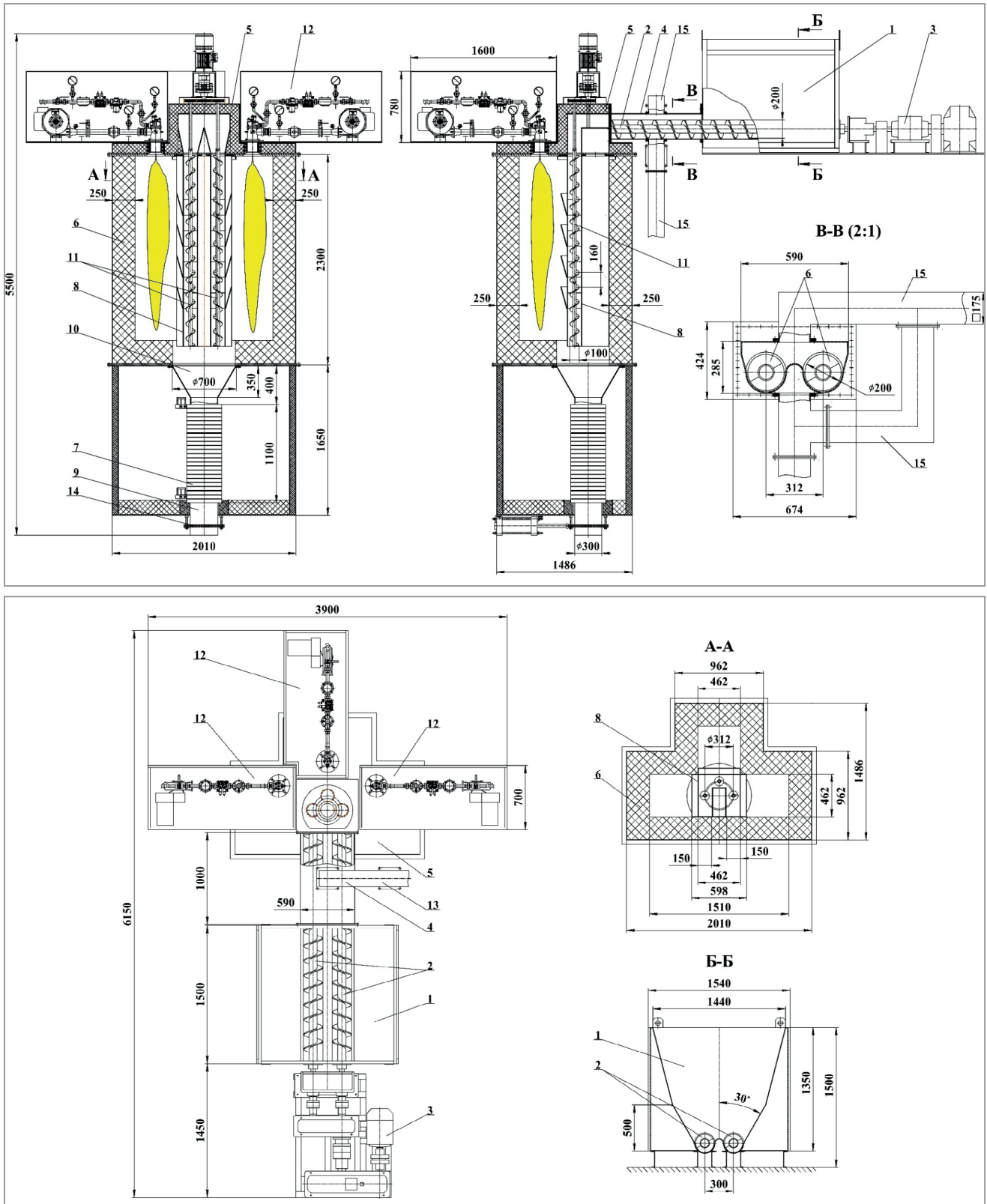


Рис. 2. Прходная муфельная печь с П-образным муфелем

Из П-образного муфеля 8 стружка сбрасывается в чашу 10, которая представляет собой неотъемлемую часть топки печи, куда поступает нагретый воздух. Стружка разрыхляется, высвобождая значительное количество энергии в виде паров воды и масла. Пары масла сгорают, повышая температуру топочного пространства. Образовавшийся поток газов выходит в канал между стенками муфеля, обогревая его с противоположных от горелок сторон. Это создает условия для равномерного прогрева стружки по сечению муфеля.

В муфель 9 индуктора стружка поступает при полном отсутствии воды, содержание масла не превышает 3%. Термической возгонке подвергаются остатки тяжелых углеводородов. Таким образом, создаются условия для окончательного высокопроизводительного и высокоэффективного индукционного нагрева металла. Благодаря наличию контактов между частицами металла с повышенным электросопротивлением плотная металлическая сердцевина муфеля нагревается со скоростью, превышающей скорость нагрева компактного металла. Вместе с тем габариты индуктора ограничены затратами электроэнергии, которые находятся в квадратичной зависимости от числа витков. Мощность индуктора ограничена температурой нагрева муфеля, от которой зависит его эксплуатационная стойкость. Рабочая температура стального муфеля не должна превышать 900 °С. Применение индукционного нагрева в сочетании с предварительным газопламенным обеспечивает достижение заданной температуры нагрева шихты при наименьших затратах энергии. Печь, построенная по такому принципу, обладает наименьшими габаритами и наивысшей производительностью. Температура стружки регулируется автоматически в зависимости от заданной температуры на выходе из печи.

На рис. 3 показана технологическая схема горячего брикетирования стружки черных металлов. Технологический процесс включает в себя следующие технологические операции:

- сепарирование стружки и шламов с целью удаления концевых отходов и других твердых предметов (резцов, болтов, гаек, брусков абразива и пр.), мокрую магнитную сепарацию и механический отжим шламов, дробление шламовых брикетов в порошок, дробление стальной стружки;
- приготовление шихты смешиванием компонентов;
- пламенно-индукционный нагрев шихты до температуры неполной горячей деформации (700–850 °С) в защитной атмосфере продуктов термической возгонки масляного компонента СОЖ;
- подачу и засыпку шихты в пресс-форму при минимальных потерях теплоты (не более 50 °С);
- брикетирование на гидравлическом прессе горизонтального исполнения под давлением 470–500 МПа.

Шлифовальные шламы перед брикетированием совместно со стружкой подвергаются мокрой магнитной сепарации и механическому отжиму от остатков влаги. Плотность горячепрессованных брикетов достигает 90–95% плотности компактного материала того же химического состава. Технологический процесс включает в себя также очистку, обезвреживание и утилизацию теплоты уходящих дымовых газов.

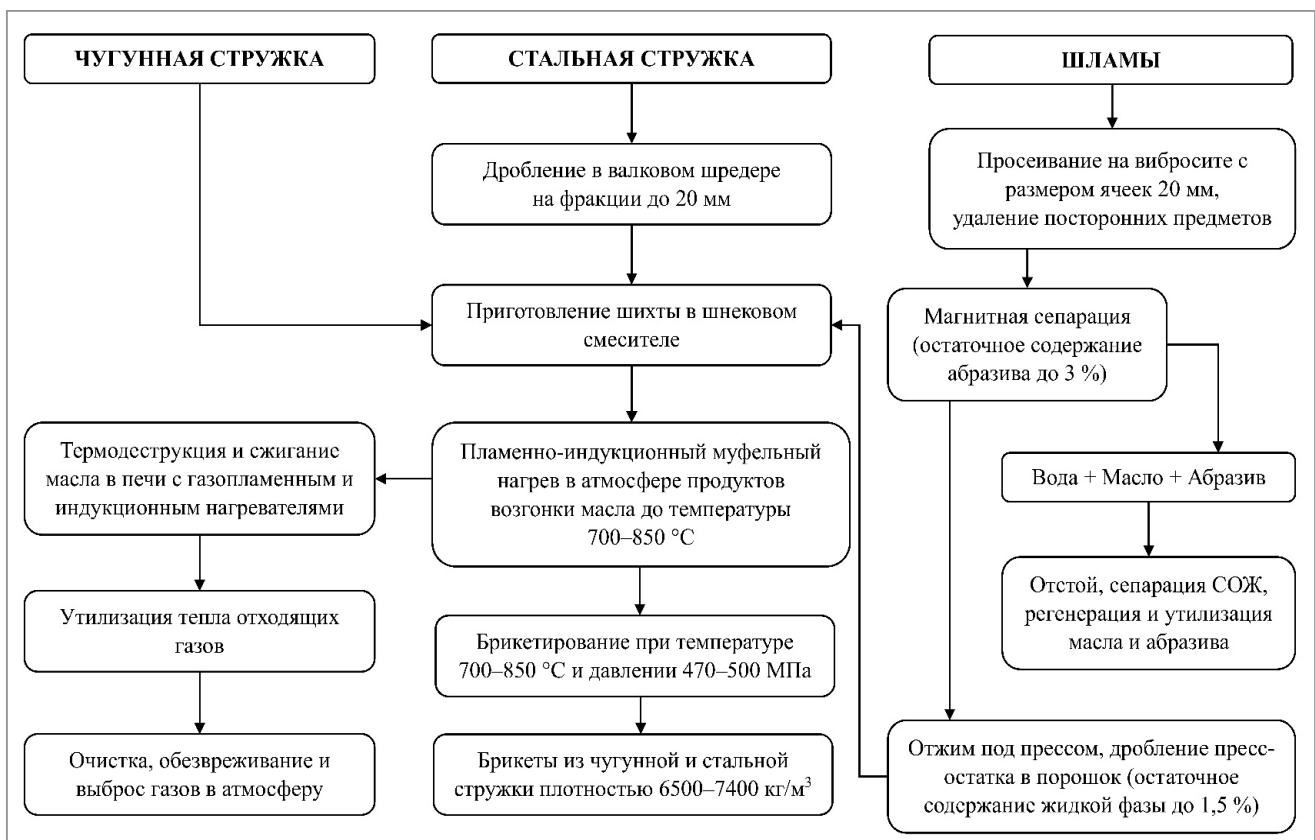


Рис. 3. Технологическая схема горячего брикетирования стружки черных металлов

На рис. 4 показана технологическая схема пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов в собственной защитной атмосфере продуктов термической возгонки СОЖ. Технологический процесс включает в себя тепло- и массоперенос, сопровождаемые термохимическими превращениями СОЖ.

В установке горячего брикетирования нагревательная печь и выпускная горловина муфеля располагаются непосредственно над приемным бункером гидравлического пресса горизонтального исполнения. Потери теплоты при выходе из печи вплоть до подачи в пресс-форму не превышают 50 °С.

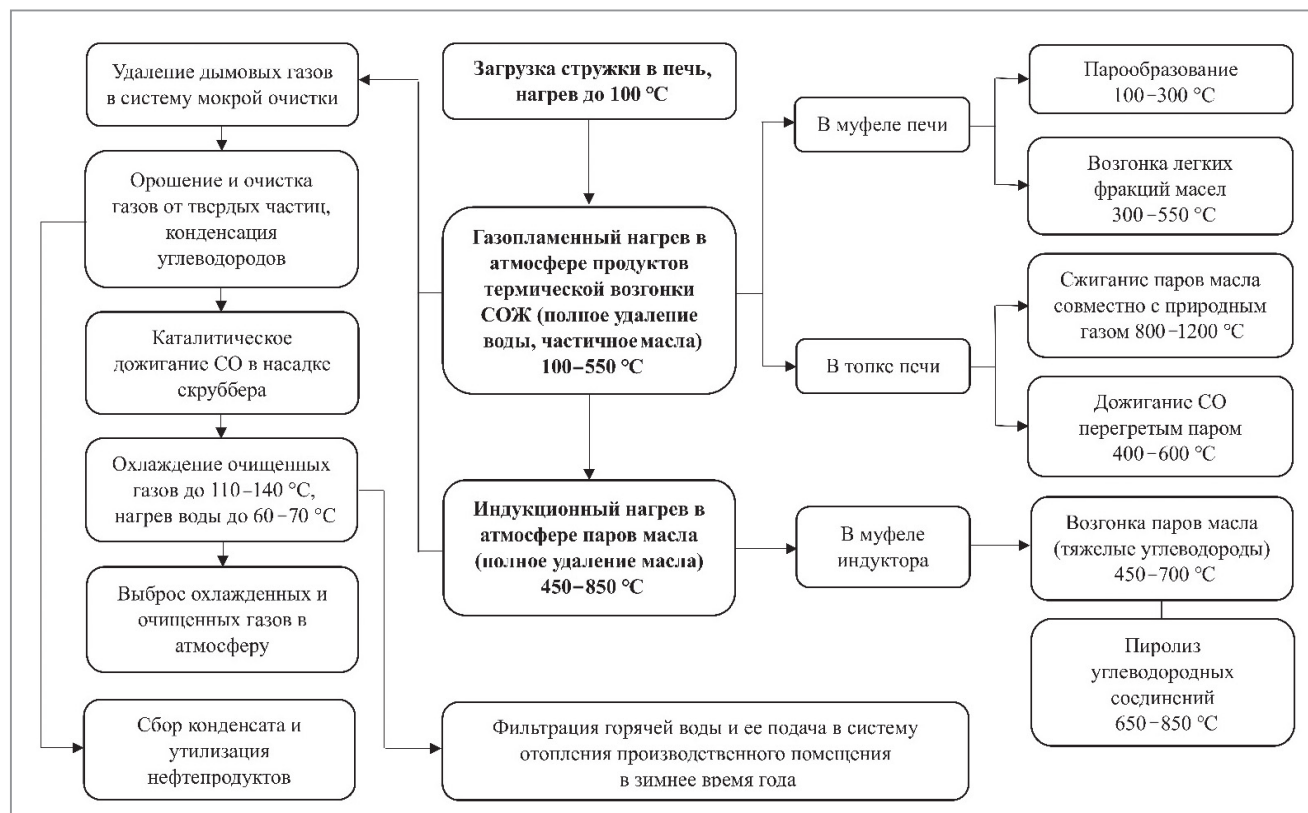


Рис. 4. Технологическая схема пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов

Система мокрой очистки дымовых газов

Система мокрой газоочистки показана на рис. 5. Ее суть заключается в смачивании и коагуляции пылевых частиц или поглощении газов жидкими реагентами (принцип сорбции). Главное преимущество способа состоит в возможности уловить частицы размером 3–5 мкм. Коэффициент очистки достигает значения 99 %, аэрозоли улавливаются до 99,9 %. В качестве сорбентов в насадке скруббера используются сода, суспензия извести, соединения аммиака, суспензия доломита, кальцинированная вода, карбонат натрия и др. Эти соединения связывают вредные вещества в солевые образования. Для каждой СОЖ выбор сорбентов и технологии очистки индивидуальный.

Система работает следующим образом. Газы выходят из головки печи и далее по трубам с помощью дымососа направляются в скруббер Вентури. В трубе Вентури вода орошает газы в противотоке. В насадке скруббера остатки СО дожигаются в присутствии хромоникелевого катализатора (каталитическое дожигание). Сажистый углерод (сажа) и другие твердые частицы не преодолевают водный заслон, оседают в насадке, смываются и вместе с водой удаляются в канал сточной воды. На дне канала образуется осадок в виде шлама. Газообразные остатки углеводородов конденсируются и скапливаются на поверхности воды в виде масла.

Очищенные и охлажденные газы (CO_2 и H_2O) преодолевают гидравлическое сопротивление водного заслона скруббера и механическое сопротивление насадок под действием тяги дымососа, выбрасываются через трубу в атмосферу. Температура газов понижается до 110–140 °С, вода нагревается до 60–70 °С.

Сбор масла с поверхности воды в канале осуществляется с помощью плавающего поплавка насосной установки. Масло отправляется на нефтеперерабатывающий завод или используется в собственном производстве для приготовления СОЖ. Порошкообразный осадок (сажистый углерод) используется в металлургических брикетах. Чистка канала производится по мере накопления осадка (25–30 % объема).

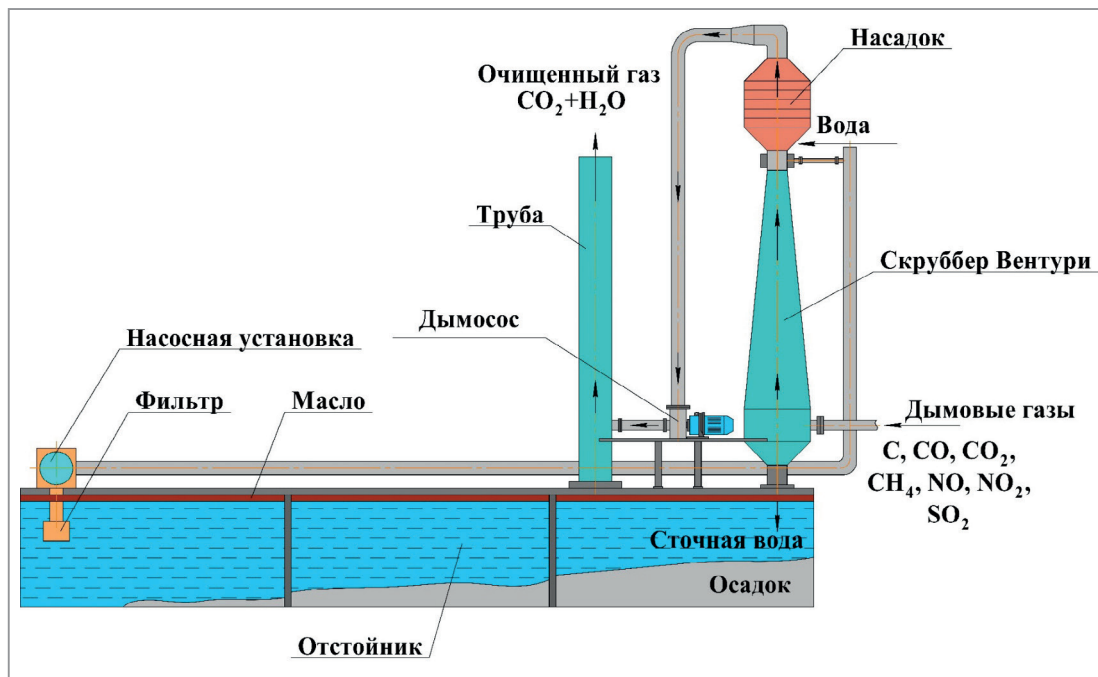


Рис. 5. Система мокрой очистки дымовых газов

При необходимости чистая отфильтрованная вода ($40\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$) из третьего отсека канала с помощью насосной станции направляется в радиаторы отопления цеха в зимнее время года. Возврат воды в канал и поддержание ее уровня производятся автоматически. Компенсация потерь воды (приблизительно $2\text{ м}^3/\text{ч}$, главным образом из-за испарения в скруббере) производится из общей системы водоснабжения завода.

Выводы

1. В результате проведенного теоретического и экспериментального исследования пламенно-индукционного нагрева стальной и чугунной стружки установлены оптимальные режимы нагрева, габариты печи и соотношение размеров ее составных частей (газопламенного и индукционного нагревателей), что послужило основой для разработки новой технологии нагрева, обеспечивающей по сравнению с известными аналогами минимизацию размеров, повышение производительности и КПД печи. Установлено, что на этапе испарения и удаления из стружки паров воды и легких фракций масла в интервале температур $100\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ до момента достижения оптимальной концентрации масла $1,5\text{--}3,0\%$ среди всех известных способов муфельного нагрева наиболее экономичным и производительным является газопламенный нагрев, а в дальнейшем при нагреве обезвоженной пористой массы металла плотностью $1100\text{--}1700\text{ кг}/\text{м}^3$ до $850\text{ }^\circ\text{C}$ – индукционный нагрев в атмосфере продуктов термической возгонки и деструкции СОЖ. Индукционный нагрев целесообразно проводить с частотой тока $2,0\text{--}2,4\text{ кГц}$ при соотношении протяженности зон газопламенного и индукционного нагрева $2,0\text{--}2,5$ и размеров индуктора (высоты к диаметру отверстия) $3,7\text{--}4,0$. Полученные данные позволили разработать конструкцию малогабаритной печи удельной производительностью $6500\text{--}9500\text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ и КПД $40\text{--}45\%$.

2. По результатам экспериментального исследования влияния условий и режимов муфельного нагрева на формирование состава и свойств стальной и чугунной стружки установлено протекание процессов возврата и частичной рекристаллизации металла при температурах неполной горячей деформации $700\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$, сопровождаемых снижением прочностных характеристик металла в $6\text{--}7$ раз, полной очисткой твердых частиц от масляных загрязнений и СОЖ. При плотности углеводородов и продуктов их распада в муфеле $15\text{--}25\text{ кг}/\text{м}^3$ металлические частицы стружки полностью защищены от окисления. Для поддержания избыточного давления в муфеле суммарная площадь щелевых отверстий в стенке муфельной трубы не должна превышать $3\text{--}5\%$ площади ее поперечного проходного сечения. Степень окисленности горячепрессованных брикетов соответствует исходному содержанию кислорода в стружке: у стальной – $1,3\text{--}1,7\%$, чугунной – $0,46\text{--}0,47\%$.

3. Разработаны технология и оборудование пламенно-индукционного нагрева стружки черных металлов, включая системы мокрой очистки, обезвреживания и утилизации теплоты дымовых газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ровин, С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С.Л. Ровин. – Минск: БНТУ, 2015. – 382 с.
2. Переработка стружки черных металлов / С.Л. Ровин [и др.] // Литье и металлургия. – 2017. – № 4. – С. 94–101.
3. Дьяконов, О.М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О.М. Дьяконов. – Минск: Технология, 2012. – 262 с.
4. Дьяконов, О.М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 1 / О.М. Дьяконов, А.А. Литвинко, В.Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 59–67.
5. Дьяконов, О.М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 2 / О.М. Дьяконов, А.А. Литвинко, В.Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 70–82.
6. Дьяконов, О.М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 3 / О.М. Дьяконов, А.А. Литвинко, В.Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 84–93.

REFERENCES

1. Rovin S.L. *Recikling metallootodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary furnaces]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
2. Rovin S.L., Rovin L.E., Zayac T.M., Valickaya O.M. Pererabotka struzhki chernyh metallov [Recycling of ferrous metal shavings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 4, pp. 94–101.
3. D'yakonov O.M. *Kompleksnaya pererabotka struzhki i metallosoderzhashchih shlamov* [Complex processing of shavings and metal-containing sludge]. Minsk, Tekhnologiya Publ., 2012, 262 p.
4. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V.Y. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi goryachego briketirovaniya. Soobshchenie 1 [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the passthrough muffle furnace of hot briquetting. Message 1]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 59–67.
5. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V.Y. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi goryachego briketirovaniya. Soobshchenie 2 [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the passthrough muffle furnace of hot briquetting. Message 2]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 70–82.
6. Dyakonov O.M., Litvinko A.A., Sereda V.J. Modelirovanie processa nagreva struzhko-poroshkovykh dispersij chernyh metallov v prohodnoj mufel'noj pechi goryachego briketirovaniya. Soobshchenie 3 [Modeling of the process of heating of chip-powder dispersions of ferrous metals in the pass-through muffle furnace of hot briquetting. Message 3]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 2, pp. 84–93.