

Алгоритм расчета математической подмодели цепной зоны трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентрата с известняком на производстве глинозема

Э.Р. Федорова, В.В. Моргунов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Аннотация: В работе представлен алгоритм расчёта тепловых процессов в цепной зоне трубчатых вращающихся печей, используемых для спекания нефелинового концентрата с известняком. Модель основана на тепловых и материальных балансах с учётом взаимодействия газового потока, слоя материала, пылевых частиц и футеровки. Алгоритм учитывает влияние геометрии и плотности цепной навески на теплообмен и интегрирован с подмоделями осевого движения материала и пылеуноса. Расчёт реализован в виде итерационной схемы, обеспечивающей согласование температур газа и материала. Алгоритм позволяет определять температурные распределения, тепловые потоки и потери, а также выполнять параметрическую оптимизацию режимов и конструкции печи.

Ключевые слова: трубчатая вращающаяся печь, нефелиновый концентрат, математическая модель, цепная зона, теплообмен, движение материала, пылеунос, алгоритм.

Введение

В последние годы усилилось внимание исследователей к внедрению современных методов автоматизации в управление трубчатыми вращающимися печами. Наиболее активно рассматриваются направления, связанные с применением программно реализованных датчиков и технологий усовершенствованного управления процессами.

Под мягким датчиком понимается средство косвенного измерения, определение которого приведено в стандарте ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016. При этом важно различать термины «мягкий датчик» и «виртуальный прибор». Первый представляет собой математическую модель, предназначенную для оценки параметров, которые не поддаются прямому измерению, тогда как виртуальный прибор — это программный инструмент, имитирующий функции реального измерительного устройства и взаимодействующий с физическими сенсорами для получения и обработки данных [1–3]. Технология мягких датчиков активно развивается и внедряется на промышленных

объектах, позволяя определять величины, недоступные для прямого измерения, что, в свою очередь, создает предпосылки для построения новых контуров регулирования [4–6]. В случае трубчатых вращающихся печей такими параметрами могут быть, например, высота слоя материала, его скорость перемещения или степень перемешивания.

Другим направлением развития является применение усовершенствованных систем управления и оптимизации технологических процессов, основанных, в частности, на прогнозирующих моделях (ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016). Такие подходы позволяют эффективно управлять объектами с выраженной инерционностью, нелинейностью, неустойчивостью отдельных контуров регулирования и взаимосвязанными многомерными параметрами [7–9]. Для трубчатых вращающихся печей, дополнительно характеризующихся параметрической неопределенностью и непостоянным запаздыванием сигналов измерения, применение методов усовершенствованного управления представляет собой перспективное направление исследований.

В данной статье предлагается алгоритм расчёта зоны печи с теплообменным устройствами (цепной завесой) на примере мокрой трубчатой вращающейся печи с двухсторонним питанием для спекания нефелинового концентрата с известняком на производстве глинозема. Предложенную подмодель планируется использовать как составную часть модели трубчатой вращающейся печи в составе системы предиктивного управления.

Параметры для расчёта модели и данные для её последующей верификации были взяты из научной литературы на примере печей Пикалевского глиноземного завода [10–12].

Предложенный алгоритм расчёта основывается на математических моделях цементных печей опубликованных в [13] и методике расчёта длины цепной зоны [14]. Рассматриваемый алгоритм учитывает отличия в подаче

пыли, а также связывает расчёт теплообмена в цепной зоне с подмоделью осевого движения [15] и пылеуноса [16]. Кроме того, в представленном алгоритме описаны методы итеративного решения системы уравнений модели и приведены рекомендации по выбору оптимальных значений расчётных параметров.

Разработанный алгоритм расчёта цепной зоны вращающейся печи реализует последовательное моделирование теплового и материального балансов с учётом теплообмена между газом, материалом, пылью и футеровкой. На первом этапе определяется состав сырья и продуктов горения, расход воздуха и газов, а также содержание влаги и углекислого газа, выделяющихся в процессе нагрева. Далее рассчитываются массовые и объемные расходы компонентов, а также состав газовой смеси на входе и выходе зоны.

Затем выполняется энергетический баланс, включающий определение энталпии материала, газов и пыли при заданных температурах. На основе этого вычисляются тепловые потоки, потери в окружающую среду и количество теплоты, необходимое для нагрева и испарения влаги. Внутренний итерационный цикл определяет температуру газа на входе из условия равенства энталпий притока и оттока.

После получения температурного поля определяется среднелогарифмический температурный напор, средние температуры газа и материала, а также геометрические и аэродинамические параметры зоны — скорость газового потока, степень заполнения, число Рейнольдса и Нуссельта. На их основе рассчитывается коэффициент теплоотдачи, параметры цепной навески и площадь футеровки.

Итерационный цикл верхнего уровня выполняет подбор температуры материала и остаточной влажности на выходе из зоны так, чтобы рассчитанная длина цепной завесы совпадала с заданной. При этом после каждой итерации

обновляются параметры теплообмена, температуры стенок и коэффициенты теплопередачи до достижения сходимости.

Входные параметр

Входные параметры можно условно разделить на четыре крупные группы: константы и справочные данные, параметры печи, параметры потоков, параметры расчёта.

Группа «Параметры печи». Значения для параметров данной группы взяты из источника [14]. К ним относятся: внешний диаметр кожуха печи $D_{внеш} = 3.6$ м, внутренний диаметр кожуха печи $D_{внутр} = 3.4$ м, толщина футеровки печи $S_{\phi} = 0.1$ м, плотность навески цепей в зоне $F_{ц}/F_{\phi} = 3.7$, длина от начала печи до начала цепной зоны $L_s = 3.6$ м, протяжённость цепной зоны $L_{ц} = 23.4$ м, поперечный шаг гирлянды цепи $S_1 = 1.32$ м, продольный шаг гирлянды цепи $S_2 = 2$ м, длина цепи $l_{ц} = 4.5$ м, диаметр звена цепи $d_{ц} = 0.025$ м, скорость вращения печи $n = 1.8$ об/мин, производительность печи по клинкеру $G_{кл} = 39000$ кг/ч, угол наклона печи $\alpha = 2.3$ градуса, продольный шаг навески $l_2 = 1$ м, температура окружающей среды $T_{oc} = 20$ °C.

Группа «Параметры материальных потоков». Значения для параметров данной группы взяты из источников [10,14,17].

Параметры, характеризующие материал на входе в цепную зону: температура материала на входе в зону $T'_m = 46$ °C, расход сухой шихты $G_{сух. шихта} = 53960$ кг/ч, влажность шихты $W_1 = 29\%$, массовая доля потерь при прокалке в исходной сухой шихте ППП = 26.%, массовая доля Al_2O_3 в исходной сухой шихте $Al_2O_3' = 11.6\%$, массовая доля Na_2O в исходной сухой шихте $Na_2O' = 7.2\%$, массовая доля CaO в исходной сухой шихте $CaO' = 32.7\%$, массовая доля SiO_2 в исходной сухой шихте $SiO_2' = 17.7\%$, массовая доля Fe_2O_3 в исходной сухой шихте $Fe_2O_3' = 1.6\%$, Массовая доля CO_2 в исходной сухой шихте $CO_2' = 26\%$, массовая доля $CaCO_3$ в исходной сухой шихте $CaCO_3' =$

58.7%, массовая доля нефелина в исходной сухой шихте $Nep' = 32.3\%$, высота слоя материала $h = 0.7$ м.

Параметры, характеризующие газ на выходе из цепной зоны: температура газа на выходе из зоны $T_g'' = 180$ °C, коэффициент избытка воздуха $K_{air} = 1.16$, массовые расход топлива (мазут) $G_t = 4430$ кг/час, влажность (массовая доля воды) топлива $W_t = 3\%$, массовая доля водорода в топливе $H = 11.8\%$, массовая доля углерода в топливе $C = 85\%$, массовая доля азота в топливе $N = 0.6\%$, массовая доля серы в топливе $S = 0.5\%$.

Параметры, характеризующие пылеунос и пылеосаждение в цепной зоне: массовая доля нефелина в составе пыли $Nep^{\Pi} = 50.5\%$, массовая доля $CaCO_3$ в составе пыли $CaCO_3^{\Pi} = 49\%$, процент пыли от общего пылевыноса, который уносится из цепной зоны $f_u^0 = 60\%$, процент пыли от общего пылевозврата, который оседает в цепной зоне $f_r^0 = 40\%$, общий пылеунос $G_{\Pi} = 14000$ кг/ч, общий пылевозврат $G_{\Pi,воз} = 13000$ кг/ч.

Высота слоя материала рассчитывается в отдельной подмодели осевого движения материала вдоль печи. В данной работе подмодель осевого движения не рассматривается, но она основывается на работе [18], при этом скорость осевого движения в цепной зоне рассчитывается по уравнениям из работы [14].

Группа «Константы и справочные данные». К ним относятся: степень черноты корпуса печи $\epsilon = 0.95$ по материалам источника [18], энталпия соединений H_{CaCO_3} , H_{CO_2} , $H_{Fe_2O_3}$, H_{H_2O-liq} , H_{H_2O-vap} , H_{O_2} , H_{N_2} (кДж/кг) рассчитанная по уравнениям теплосодержания [18], энталпия нефелина H_{Nep} (кДж/кг), рассчитанная через удельную теплоёмкость при различных температурах на основе данных из работы [19], а также ρ плотность (кг/м³), динамическая вязкость μ (Па·с) и теплопроводность λ (Вт/(м·К)) при различных температурах и атмосферном давлении газов для CO_2 , O_2 , N_2 и H_2O на основе данных из [20–23].

Группа «Параметры расчёта». К ним относятся: критерий завершения итераций при вычислении длины цепной зоны $tol_1 = 0.0001$, максимальное число итераций основного цикла по температуре материала на выходе из цепной $MI_1 = 200$, счётчик итераций основного цикла по температуре материала на выходе из цепной зоны $i = 0$, шаг численного дифференцирования по температуре $z_1 = 0.01$, критерий сходимости итераций по уточнению температуры газового потока $tol_2 = 0.001$, максимальное число итераций по температуре газа $MI_2 = 50$, счётчик итераций по температуре газа $j = 0$, нижняя граница интервала при вычислении температуры газа на входе в цепную зону методом Брента $a = 0$ °C, верхняя граница интервала при вычислении температуры газа на входе в цепную зону методом Брента $b = 2000$ °C, шаг численного дифференцирования по влажности $z_3 = 0.01$, максимальное число итераций по влажности материала на выходе из цепной зоны $MI_3 = 200$, счётчик итераций по влажности материала на выходе из цепной зоны $k = 0$, флаг, который может быть нулем и единицей, сигнализирующий о том, что длина цепной зоны становится нечувствительной к изменению влажности $p = 0$, начальное приближение температуры материала на выходе $T_m'' = 96$ °C, начальное приближение остаточной влажности материала $W_2 = 7\%$, начальное приближение температуры газа на входе в зону $T_g' = T_g''$, начальное приближение температуры корпуса в зоне цепей $T_k = 100$ °C, критерий сходимости итераций по уточнению температуры корпуса печи $tol_4 = 0.5$, максимальное число итераций по температуре корпуса печи $MI_4 = 50$, счётчик итераций по температуре корпуса печи $f = 0$.

Малый шаг численного дифференцирования z_1 и критерий сходимости tol_1 обеспечивают устойчивость итерационного процесса при расчёте температурного баланса методом Ньютона. Максимальное число итераций по температуре и влажности MI_1 , MI_3 , MI_4 выбрано с запасом для предотвращения преждевременного прерывания цикла в случае замедленной

сходимости. Начальные приближения температуры T_m'' и влажности W_2 соответствуют типовым условиям печи [14]. При задании начальных приближений учитывается, что при $T_m'' > 0$, $W_2 = 0$. Для первой итерации расчёта температура газа на входе принимается равной температуре газа на выходе.

Алгоритм

Алгоритм расчёта подмодели цепной зоны (рис. 1) основан на последовательном согласовании материальных, пылевых, газовых и тепловых балансов с определением расчётной длины цепной зоны как выходного параметра. Входными данными являются расход и состав влажной шихты, её начальная влажность, параметры газового потока и продуктов сгорания топлива, геометрия печи, цепной навески и футеровки, а также теплофизические свойства компонентов.

На первом этапе формируется входной материальный поток в цепную зону. Определяются расход влажной шихты, удельный расход по отношению к производительности печи и массовые расходы основных компонентов, включая оксиды, карбонаты и влагу. Для воды отдельно учитываются свободная и связанная формы, что необходимо для последующего расчёта фазовых превращений.

Параллельно формируется пылевой поток. Рассчитываются удельные расходы пыли на входе и выходе цепной зоны, а также массовый состав возвращаемой пыли. Состав пыли определяется по молярным соотношениям химических компонентов, после чего вычисляются удельные массы пылевых компонентов в газовом потоке до и после цепной зоны. Часть пыли, изменяющая массу материала в постели, учитывается в материальном балансе цепной зоны. Геометрия слоя материала описывается через степень заполнения поперечного сечения печи.

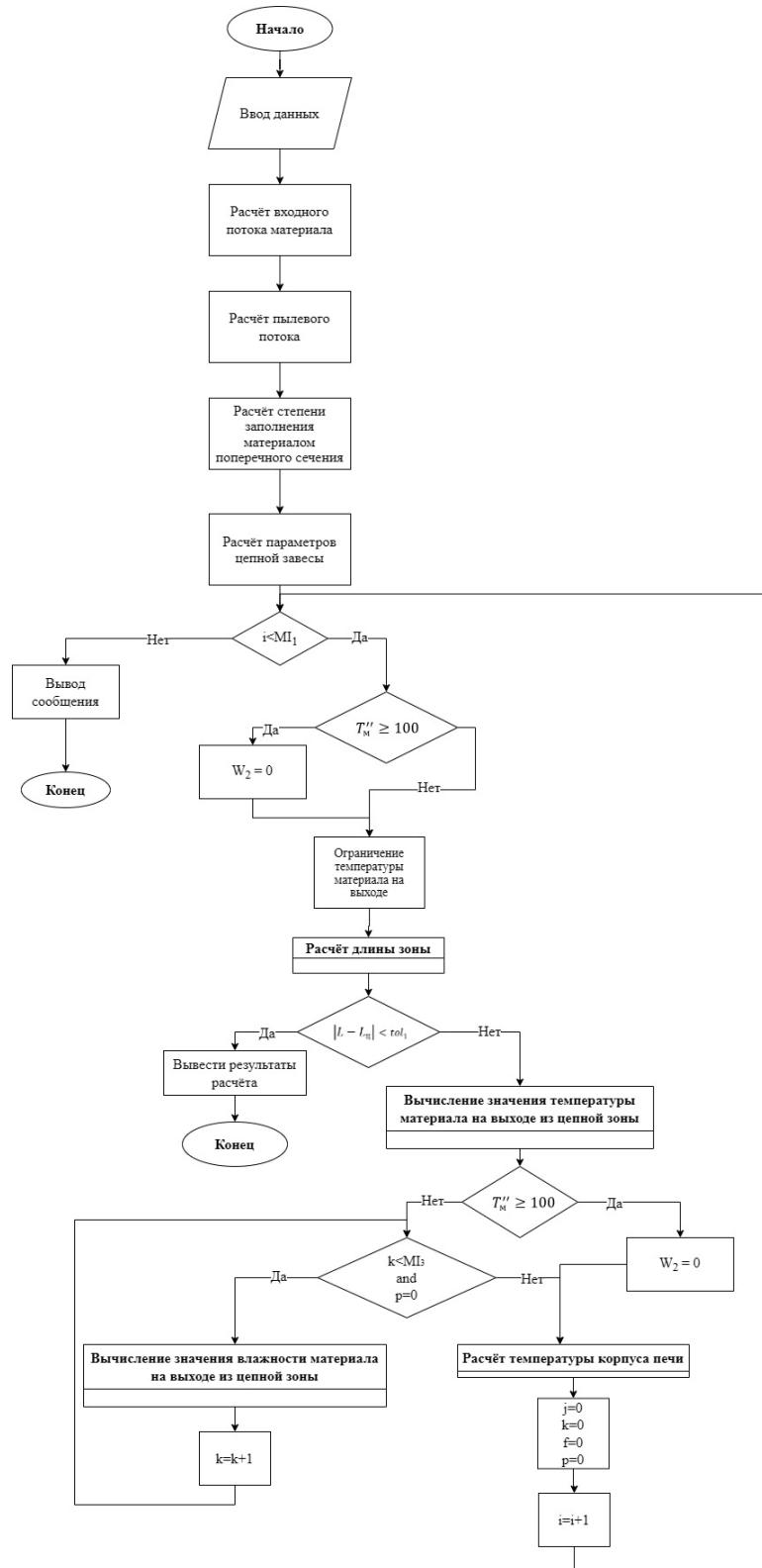


Рис. 1. – Алгоритм расчёта подмодели цепной зоны трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентратата с известняком [составлено авторами]

Для этого по внутреннему диаметру печи и высоте слоя определяется площадь сегмента, занимаемого материалом, и вычисляется отношение этой площади к площади полного сечения. Геометрия цепной навески учитывается через параметры гирлянды, включая центральный угол и стрелу прогиба, по которым определяется коэффициент гирляндной навески, используемый далее при расчёте теплообмена. После этого выполняется расчёт выходного материального потока без учёта пыли, а затем с учётом пылеуноса и возврата пыли (рис. 2). Определяются расходы и удельные массы компонентов материала на выходе из цепной зоны, а также новая влажность материала. Эти данные используются для расчёта энталпий материала до и после цепной зоны.

Газовый расчёт включает определение количества водяного пара, образующегося при испарении свободной и связанной влаги, количества углекислого газа, выделяющегося при разложении карбонатов, а также состава продуктов сгорания топлива. На этой основе формируется состав газовой смеси до и после цепной зоны и рассчитывается расход газового потока.

Тепловой баланс цепной зоны включает энталпии материала, пыли и газовой фазы, теплоту испарения влаги и теплопотери через корпус печи. Теплопотери рассчитываются с учётом теплопроводности футеровки и теплообмена наружной поверхности корпуса с окружающей средой за счёт конвекции и излучения. Температура корпуса уточняется в отдельном итерационном контуре до достижения сходимости (рис. 3). Энталпия газа на входе в цепную зону определяется двумя способами: через тепловой баланс и через сумму энталпий компонентов газовой смеси. Для согласования этих значений используется метод Брента, позволяющий определить температуру газа на входе в цепную зону, при которой выполняется тепловой баланс.

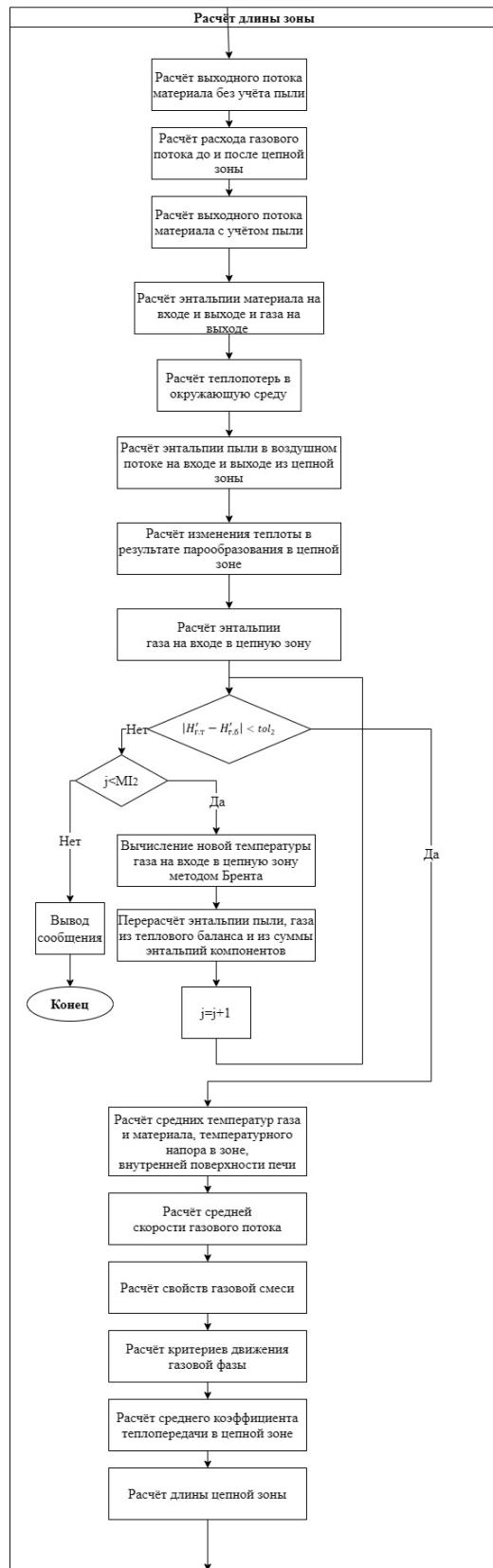


Рис. 2. – Внутренний блок «Расчёт длины цепной зоны» [составлено авторами]

В процессе итераций пересчитываются теплофизические свойства газовой смеси, включая плотность, вязкость и теплопроводность.

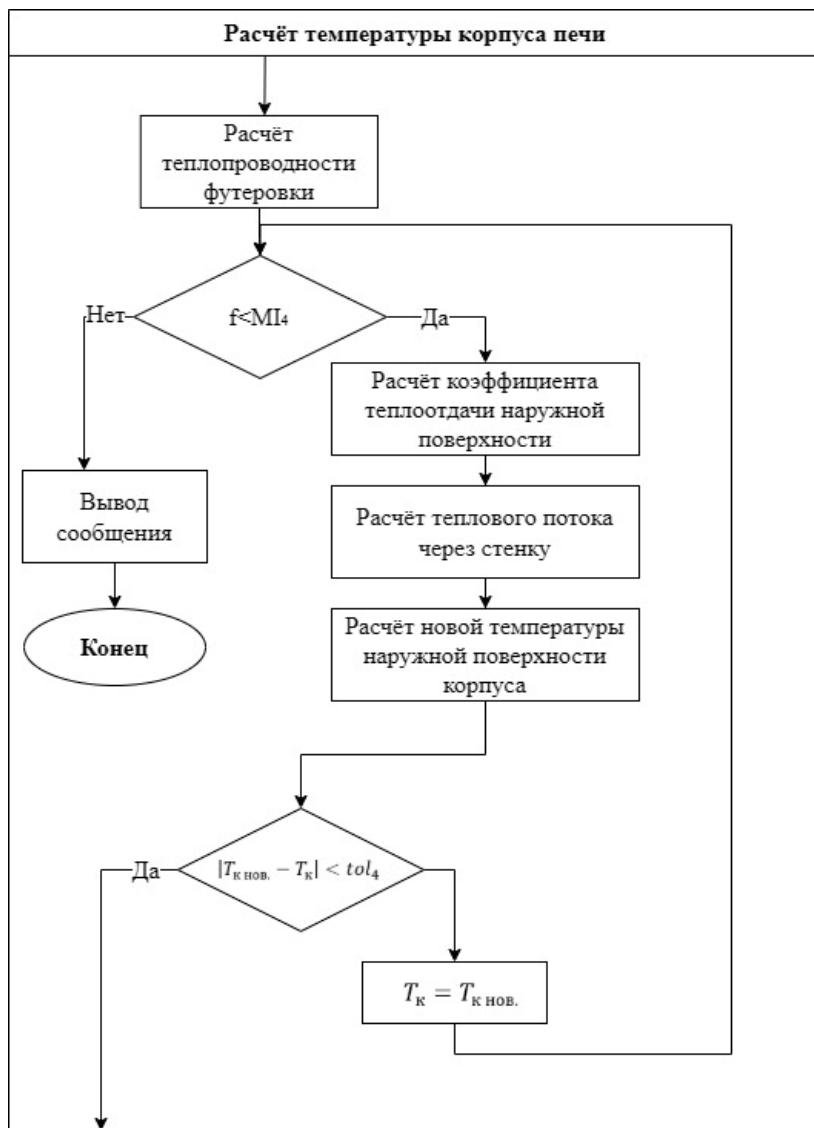


Рис. 3. – Внутренний блок «Расчёт температуры корпуса печи» [составлено авторами]

На основе рассчитанных свойств газа определяются критерии движения газовой фазы и коэффициент теплоотдачи в цепной зоне. Используя рассчитанный коэффициент теплоотдачи, определяется количество теплоты, передаваемое от газа к материалу, и вычисляется расчётная длина цепной зоны.

Согласование расчётной длины цепной зоны с заданной геометрией выполняется во внешнем итерационном контуре. В качестве переменных коррекции используются температура и влажность материала на выходе из цепной зоны (рис. 4). Для этого оценивается чувствительность длины зоны к изменению этих параметров методом конечных разностей, после чего выполняется их корректировка. Коррекция температуры и влажности ограничивается физически допустимыми диапазонами.

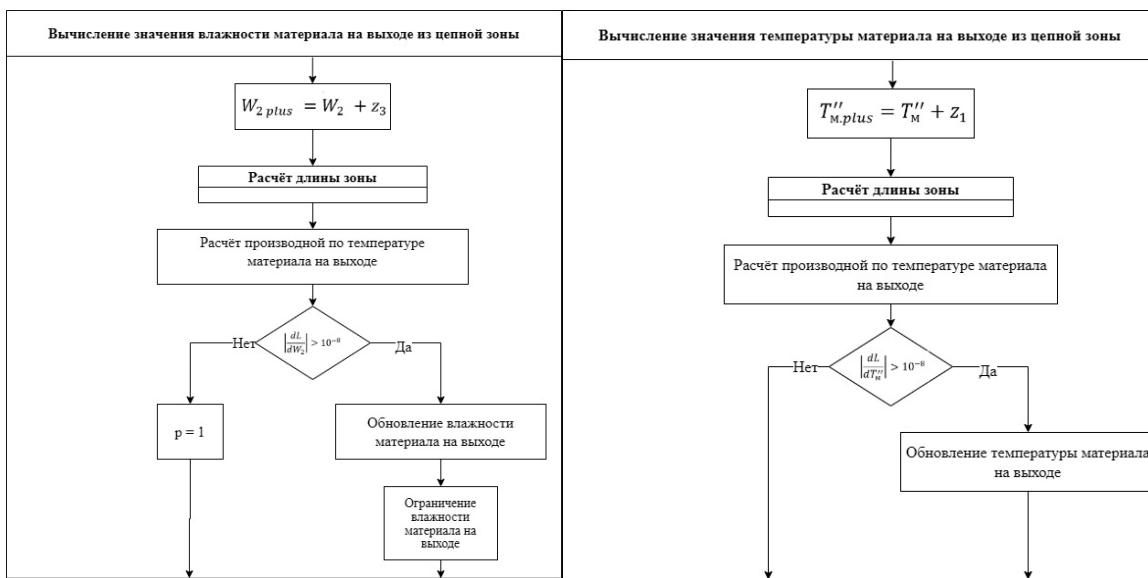


Рис. 4. – Внутренний блок «Вычисление значения температуры материала на выходе из цепной зоны» и Внутренний блок «Вычисление значения влажности материала на выходе из цепной зоны» [составлено авторами]

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока расчётная длина цепной зоны не совпадёт с заданной в пределах допуска, либо пока не будет достигнуто максимальное число итераций. Алгоритм содержит контроль сходимости по температуре газа, температуре корпуса, температуре и влажности материала, а также по длине цепной зоны.

В результате расчёта определяются температура газа на входе и выходе из цепной зоны, температура и влажность материала на выходе, температура корпуса печи, состав и расход газового потока, тепловые потоки и теплопотери, а также расчётная длина цепной зоны. Алгоритм предназначен

для использования при инженерных расчётах тепловых режимов вращающихся печей и может быть включён в состав комплексных моделей и систем предиктивного управления процессом спекания нефелинового концентрата.

Литература

1. Ilyushin Y.V., Martirosyan A.V. The development of the soderberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. pp. 1–18.
2. Petrov P.A., Shestakov A.K., Nikolaev M.Y. Use of multifunctional crust breaker and machine vision system for acquisition and processing of aluminium reduction cell data // Tsvetnye Metally. 2023. Vol. 4. pp. 45–53.
3. Nguyen H.H., Bazhin V.Y.. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation // Metallurgist. 2023. Vol. 67. pp. 41–50.
4. Shklyarskiy Y.E., Skamyin A.N., Jiménez Carrizosa M.. Energy efficiency in the mineral resources and raw materials complex // Journal of mining institute. 2023. Vol. 261. pp. 323–324.
5. Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M. V. Numerical modeling of a stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 258. pp. 643–646.
6. Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Malkova Y.M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque // Journal of Mining Institute. Saint-Petersburg Mining University, 2022. Vol. 256. pp. 686–700.
7. Ilyushin Y.V., Kapostey E.I.. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser // Energies. 2023. Vol. 16. pp. 1–32.
8. Boikov A. et al. Universal approach for dem parameters calibration of bulk materials // Symmetry. MDPI AG, 2021. Vol. 13, № 6. pp. 1–14.

9. Beloglazov I.I., Morenov V.A., Leusheva E.L.. Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises // Egyptian Journal of Petroleum. 2021. Vol. 11. pp. 1–9.
 10. Абрамов В.Я.. et al. Основные конструктивные и технологические характеристики вращающихся печей Волховского алюминиевого и Пикалевского глиноземного заводов для спекания нефелинсодержащих шихт // Вращающиеся печи для спекания. 1964. Vol. 2. с. 63–76.
 11. Арлюк Б.И., Ермолаева Э.М.. Расчет теплообмена во вращающихся печах // Труды ВАМИ. 1969. Vol. 65–66. с. 97–105.
 12. Срибнер Н.Г.. et al. Анализ статистических данных эксплуатации вращающихся печей при спекании нефелино-известняковой шихты на пикалевском глиноземном комбинате (ППГО Глинозем) // Труды ВАМИ. 1979. Vol. 103. с. 91–97.
 13. Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. 2008. 231 р.
 14. Абрамов В.Я.. Абрамов, В.Я Исследование закономерностей работы цепных теплообменников: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.00.00 / Абрамов, В.Я -Л., 1966. -16 с.
 15. Khodorov E.I.. Material movement in a rotary kiln. Moscow: State publishing house of literature on building materials, 1957. 64 p.
 16. Ходоров Е.И.., Арлюк Б.И.. Унос материала из трубчатых вращающихся печей, оборудованных цепными завесами // Труды ВАМИ. 1968. Vol. 64. с. 60–64.
 17. Лапаев, И.И Разработка и исследование системы автоматического управления процессом спекания нефелино-известняковой шихты в трубчатой вращающейся печи автореф. дис... канд. тех. наук: 05.13.07 / Лапаев, И.И. - М., 1980 -26 с.
-

18. Беседин П.В., Трубаев П.А.. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера (2004). 2005. 440 р.
19. Арлюк Б.И.. Определение теплоемкости компонентов глиноземных спеков // Труды ВАМИ. 1967. с. 5–8.
20. Hilsenrath J. et al. Tables of Thermal Properties of Gases. Washington, D.C.: National Bureau of Standards (U.S. Department of Commerce), 1955. 493 p.
21. Haar L.W., Gallagher J.S., Kell G. NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units. Hemisphere Publishing Corporation, 1984. 340 p.
22. Fokin L.R., Kalashnikov A.N. The viscosity and self-diffusion of rarefied steam: Refinement of reference data // High Temperature. 2008. Vol. 46, № 5. P. 614–619.
23. Варафтик Н.Б. et al. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

References

1. Ilyushin Y.V., Martirosyan A.V. Scientific Reports. 2024. № 14. pp. 1–18.
2. Petrov P.A., Shestakov A.K., Nikolaev M.Y. Tsvetnye Metally. 2023. № 4. pp. 45–53.
3. Nguyen H.H., Bazhin V.Y. Metallurgist. 2023. № 67. pp. 41–50.
4. Shklyarskiy Y.E., Skamyin A.N., Jiménez Carrizosa M.. Journal of mining institute. 2023. № 261. pp. 323–324.
5. Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M. V. Journal of Mining Institute. 2022. № 258. pp. 643–646.
6. Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Malkova Y.M. Journal of Mining Institute. Saint-Petersburg Mining University, 2022. № 256. pp. 686–700.
7. Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Energies. 2023. №. 16. pp. 1–32.
8. Boikov A. et al. Symmetry. MDPI AG, 2021, № 6. pp. 1–14.

9. Beloglazov I.I., Morenov V.A., Leusheva E.L. Egyptian Journal of Petroleum. 2021. №. 11. pp. 1–9.
 10. Abramov V.Ya. i dr. Vrashchayushchiesya pechi dlya spekaniya. 1964. №. 2. pp. 63–76.
 11. Arlyuk B.I., Ermolaeva E.M.. Trudy VAMI. 1969. №. 65–66. pp. 97–105.
 12. Sribner N.G. i dr. Trudy VAMI. 1979. №. 103. pp. 91–97.
 13. Trubaev P.A., Kuznetsov V.A., Besedin P.V. Metody komp'yuternogo modelirovaniya goreniya i teploobmena vo vrashchayushchikhsya pechakh [Methods of computer modeling of combustion and heat exchange in rotating furnaces]. 2008. pp. 231.
 14. Abramov V.Ya. Abramov, V.Ya Issledovanie zakonomernostey raboty tsepnykh teploobmennikov [Research on the operation of chain heat exchangers]: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk: 05.00.00. Abramov, V.Ya -L., 1966. 16 p.
 15. Khodorov E.I. Dvizhenie materiala vo vrashchayushchikhsya pechakh [Movement of materials in rotating furnaces]. Moskva: Promstroyizdat, 1957. 64 p.
 16. Khodorov E.I., Arlyuk B.I.. Trudy VAMI. 1968. № 64. pp. 60–64.
 17. Lapaev I.I Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya protsessom spekaniya nefelino-izvestnyakovoy shikhty v trubchatoy vrashchayushchaysya pechi [Development and research of an automatic control system for the sintering of nepheline-limestone charge in a tubular rotary furnace] avtoref. dis... kand. tekhn. nauk: 05.13.07. Lapaev I.I -M., 1980. 26 p.
 18. Besedin P.V., Trubaev P.A. Energotekhnologicheskiy analiz protsessov v tekhnologii tsementnogo klinkera [Energy and Technology Analysis of Processes in Cement Clinker Technology] (2004). 2005. 440 p.
 19. Arlyuk B.I. Trudy VAMI. 1967. pp. 5–8.
 20. Hilsenrath J. et al. Tables of Thermal Properties of Gases. Washington, D.C.: National Bureau of Standards (U.S. Department of Commerce), 1955. 493 p.
-

21. Haar L.W., Gallagher J.S., Kell G. NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units. Hemisphere Publishing Corporation, 1984. 340 p.
22. Fokin L.R., Kalashnikov A.N. High Temperature. 2008. Vol. 46, № 5. pp. 614–619.
23. Varaftik N.B. i dr. Spravochnik po teploprovodnosti zhidkostey i gazov [Handbook of thermal conductivity of liquids and gases]. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 352 p.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 12.12.2025

Дата публикации: 7.02.2026