

© А. А. ОЛЕННИКОВ¹, Е. А. ОЛЕННИКОВ²,
Д. Б. ЧАПАЕВ¹, А. В. ШИРОКИХ²

¹Сибирский государственный
индустриальный университет

²Тюменский государственный университет
oaa@circul-m.ru, charaev.denis@gmail.ru,
azaharov@utmn.ru

УДК 669:519.6

**МОДЕЛИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА
И ФОРМИРОВАНИЯ ГАРНИСАЖА
В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ ТИПА СЭР**

**MODELS FOR HEAT RECOVERY
AND SKULL FORMATION IN METALLURGIC UNITS
OF SPRAY-TYPE EMULSION**

Особенностью металлургических агрегатов типа СЭР, используемых для получения металла, является протекание внутри них сложных высокотемпературных физико-химических и газодинамических процессов. Воздействие термоагрессивной среды на футеровку агрегата становится причиной возникновения аварий, частых дорогостоящих ремонтов. Любые попытки сохранить футеровку приводят к малоэффективным, а иногда и нежелательным результатам. Наиболее приемлемой альтернативой в этой ситуации является принудительное формирование защитного гарнисажного слоя с необходимыми свойствами, которые должны обеспечивать его стабильность (стойкость). Потребность в сохранении футеровки агрегата породили идею создания и использования змеевиковых секций охлаждения применительно к процессу СЭР. В данной работе рассматривается задача исследования процесса формирования гарнисажного слоя при циркуляционном охлаждении агрегата колонного типа с учетом теплофизических параметров и температурных условий формирования гарнисажа. Представлены математические модели с подробным описанием протекающих процессов в агрегатах типа СЭР, а также способы решения поставленных задач на существующих и разработанных программных комплексах.

The specific feature of metallurgical units of spray-type emulsion used for obtaining metal is flowing of complex high physico-chemical and dynamic processes within them. The impact of thermo-aggressive environment on a lining-up of units causes frequent costly repairs, as well as accident risks. Any attempts to maintain the lining-up lead to inefficient and sometimes undesirable results. The most acceptable alternative in this situation is to force the formation of the protective layer of skull with the necessary properties that should ensure its stability (resistance). The attempts to maintain the

lining-up of units generated the idea of creating and using serpentine cooling sections as applied to the spray-emulsion process. In this paper we consider the formation process of the skull layer in circulating cooling of the column-type unit taking into account the thermal parameters and temperature conditions of the skull formation. The mathematical models with a detailed description of the processes in the units of spray-type emulsion, as well as problem-solving techniques using existing and developed software packages are presented.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Агрегат типа СЭР, футеровка, корпусное охлаждение, термоагрессивная среда, утилизация тепла.

KEY WORDS. Unit of spray-type emulsion, lining-up, skull cooling, thermo-aggressive environment, heat recovery.

Для металлургических агрегатов типа СЭР характерны высокая интенсивность газодинамических процессов и термоагрессивность среды (газовзвесь и газшлакометаллическая эмульсия) [3, 8, 9, 10]. В связи с этим защита элементов конструкции агрегата посредством огнеупорной футеровки несостоятельна. Наряду с повышенным расходом огнеупоров и необходимостью частых остановок на ремонт, большой «смыв» футеровки по ходу процесса является принципиальным ограничением для реализации некоторых технологий, т. к. он ведет к изменению химсостава рабочей среды (эмульсии).

Наиболее приемлемой альтернативой в этой ситуации является принудительное формирование защитного гарнисажного слоя с необходимыми свойствами, которые должны обеспечивать его стабильность (стойкость) [1]. Для решения данной задачи авторами предлагается использовать позонно разделенную систему корпусного охлаждения технологических агрегатов, фрагмент которой представлен на рис. 1 (поз. 8).

Такой подход позволит решить сразу две задачи: формирование гарнисажного слоя внутри агрегатов, и использование тепловой энергии в целях отопления производственных помещений. На рисунке 2 представлена принципиальная схема системы корпусного охлаждения агрегатов (СКОА) [1, 5, 6]. Каждый из четырех охлаждаемых на самом деле представляет целый комплекс со своими циркуляционными насосами, что позволяет гибко регулировать отложение гарнисажного слоя в любом месте внутри каждого агрегата.

Принцип работы данной системы заключается в следующем. Вода, поступающая в контур охлаждения, подогревается до температуры 130°C, тем самым утилизируя тепло от стенок агрегата и направляясь в общую сеть к теплопотребителю (например, для отопления производственного цеха и т. д.). В результате охлаждения стенки технологического агрегата, с внутренней ее части начинает «намораживаться» расплавленный металл (гарнисаж). Охлажденная вода с температурой 70°C поступает вновь в охлаждаемые контуры, и процесс повторяется.

Актуальной задачей является разработка математических моделей, которые позволят проводить расчет теплотехнических и конструкторских характеристик СКОА на этапе ее проектирования.

Для ее решения необходимо исследовать процесс формирования гарнисажного слоя при циркуляционном охлаждении агрегатов и каналов, представленных на рис. 1 (поз. 6, 7, 9, 10) с учетом теплофизических параметров и темпе-

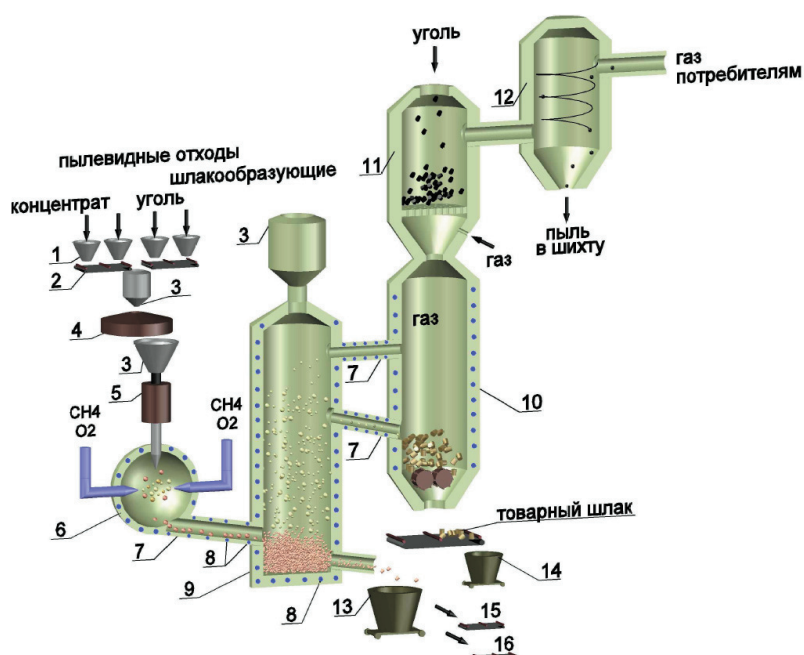


Рис. 1. Агрегат СЭР с энергоутилизирующими установками в разрезе.

- 1 — бункер; 2 — питатели; 3 — дозаторы; 4 — смеситель;
- 5 — шнековая подача; 6 — реактор-осцилятор;
- 7 — соединительный канал; 8 — позонно разделенная система корпусного охлаждения;
- 9 — рафинирующий отстойник; 10 — реактор гранулятора;
- 11 — аппарат кипящего слоя; 12 — циклон; 13 — ковш;
- 14 — бункер для приема товарного шлака;
- 15 — специальная линия для литья; 16 — разливочная линия

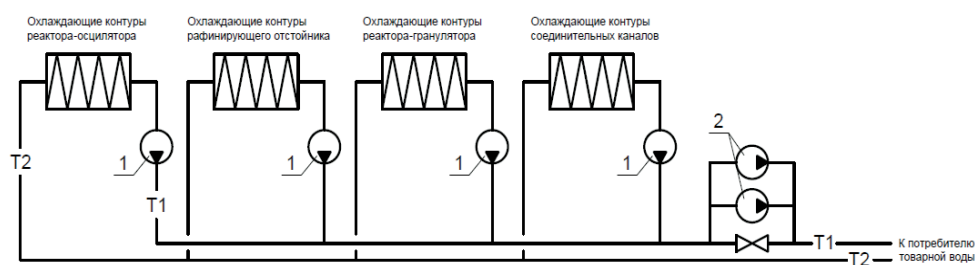


Рис. 2. Принципиальная схема системы корпусного охлаждения агрегата СЭР.

- 1 — контурный циркуляционный насос;
- 2 — сетевой циркуляционный насос;
- T1 — магистраль с горячим теплоносителем;
- T2 — магистраль с охлажденным теплоносителем

ратурных условий формирования гарнисажа. Разрез элементарного участка стенки реактора представлен на рис. 3.

При математическом описании задачи были выделены три слоя (рис. 3): 1-й — магнезит; 2-й — основной гарнисаж с газосодержанием 50%; 3-й — переходный (пенный) слой с большим объемным газосодержанием (90% и более), механизм существования которого связан с «намерзанием» и «смывом» газошлакометаллической эмульсии.

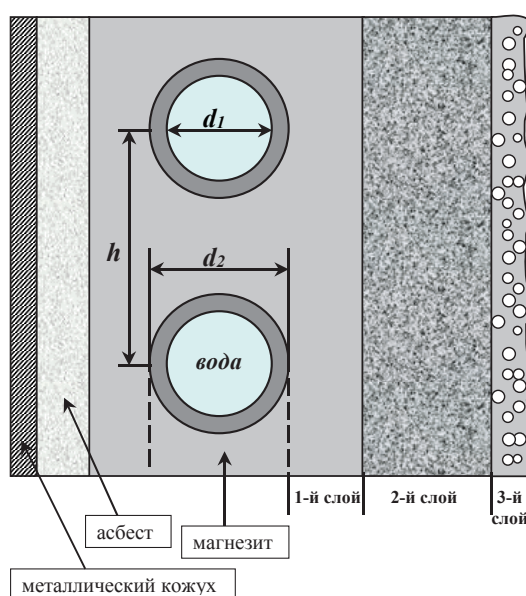


Рис. 3. Разрез элементарного участка стенки
 h — шаг змеевика, d_1 , d_2 — внутренний и внешний диаметры змеевика

Таким образом, постановка задачи сводится:

- 1) к определению возможности формирования гарнисажа при заданных конструктивных параметрах (диаметры труб, шаг змеевика, толщина магнезита) в граничных условиях, на которые влияет скорость движения и температура воды в трубах змеевика;
- 2) к определению распределения температур по сечению элементарного участка стенки реактора.

Такая постановка задачи является обобщенной. Ее реализация в данном виде неприемлема с точки зрения требований исследователя, т. к. поиск ее решения может занимать продолжительное время. Поэтому данную задачу целесообразно разбить на две подзадачи: определение влияния конструктивных параметров на тепловые потоки и исследование динамики формирования гарнисажа, т. е. на двумерную стационарную и одномерную динамическую задачи. Решение последней состоит из трех этапов.

1. Задание граничных условий на стыке с охлаждающей средой.

Использовались стыки «окружающая среда-кожух» и «вода-труба (змеевик)».

Применялись граничные условия третьего рода, при которых задается температура охлаждающей среды $t_{ж}$ и коэффициент теплоотдачи α между этой средой и охлаждаемой поверхностью, имеющей температуру t_c :

$$-\lambda_C \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_C - t_{ж}), \quad (1)$$

где λ_C — коэффициент теплопроводности материала кожуха либо трубы; n — вектор нормали к поверхности охлаждаемого тела.

Для вычисления граничных температур t_c соотношение (1) после конечно-разностной аппроксимации преобразуется к виду:

$$t_{\Gamma} = \frac{4t_{\Gamma-1} - t_{\Gamma-2} + 2\frac{\alpha}{\lambda}\Delta x \cdot t_{ж}}{3 + 2\frac{\alpha}{\lambda}\Delta x}, \quad (2)$$

где $t_c = t_{\Gamma}$, Γ — номер узла одномерной сеточной области внутрь тела, вдоль нормали к нему, на границе тела с охлаждаемой средой; $\Gamma-1$, $\Gamma-2$ — номера узлов этой сеточной области, расположенных на один и два шага дискретизации Δx внутрь тела.

2. Задание граничных условий на стыке двух материалов.

Тепловой поток, проходящий через единицу поверхности соприкосновения двух материалов на их границе, одинаков, т. е. $q_1 = q_2$. Тепловой поток q в общем случае определяется соотношением:

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial n},$$

где n — вектор нормали к поверхности соприкосновения двух тел, откуда для них с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2 следует соотношение, которое после конечно-разностной аппроксимации преобразуется к виду:

$$\lambda_1 \frac{t_{\Gamma} - t_{\Gamma-1}}{\Delta x_1} = \lambda_2 \frac{t_{\Gamma+1} - t_{\Gamma}}{\Delta x_2}, \quad (3)$$

где Γ — номер узла одномерной сеточной области на границе двух тел, вдоль нормали, к границе их соприкосновения, $\Gamma+1$, $\Gamma-1$ — номера узлов этой сеточной области, расположенных на шаг дискретизации Δx_1 и на шаг дискретизации Δx_2 внутрь первого и второго тел соответственно.

Из соотношения (3) получаем соотношение для расчета температуры на границе соприкосновения тел:

$$t_{\Gamma} = \frac{\Delta x_2 \lambda_1 t_{\Gamma-1} + \Delta x_1 \lambda_2 t_{\Gamma+1}}{\Delta x_2 \lambda_1 + \Delta x_1 \lambda_2}. \quad (4)$$

3. Описание процесса теплопроводности внутри тела.

Уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид:

$$\rho c_{\text{эф}}(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } t), \quad (5)$$

где ρ — плотность материала.

Эффективная теплоемкость $c_{\text{эф}}(t)$ равна $c_{\text{мс}}(t)$ для слоев материалов с фиксированной толщиной (труба, футеровка и т. д.).

При моделировании гидравлической системы охлаждения были разработаны две математические модели.

Модель обеспечения теплоотвода. Вывод дискретного уравнения нагрева воды для представлен для трех случаев:

- нагрев воды в случае, когда труба имеет одинаковую по периметру и всей длине температуру t_c ;
- нагрев воды в змеевиковой системе охлаждения для стабилизировавшихся внутри кладки тепловых процессов:

$$t_{i+1} = \frac{Bt_{\text{ГШМ}} + t_i \left(W - \frac{B}{2} \right)}{W + \frac{B}{2}}, \quad (6)$$

$$\text{где } B = \frac{\frac{h\Delta L_{mp}}{D_k}}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} + \frac{1}{\alpha_k D_k}};$$

D_1, D_k — внутренние диаметры агрегата; $W = Gc_p$ — водяной эквивалент; c_p — удельная теплоемкость воды при постоянном давлении; $G = \rho wF$ — массовый расход теплоносителя; h и L_{mp} — шаг и длина змеевика.

- нагрев воды в змеевиковой системе охлаждения для моделирования динамических систем:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + \frac{k_{\text{эф}} 2\pi\lambda_{mp} L_{mp} (t_{c2} - t_{c1})}{W \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)}, \quad (7)$$

где d_1, d_2 — внутренний и внешний диаметры змеевика; $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективной площади теплоотдачи трубы, учитывающий влияние шага и диаметра змеевика на процесс теплопередачи в стенках агрегата.

Модель разветвленной двухуровневой системы. Гидравлическая сеть состоит из трех гидравлических контуров, параллельно соединенных в замкнутую циркуляционную сеть (рис. 2). Каждый контур представляет собой соединенные посредством коллекторов змеевики, на которые установлены заслонки.

Расчет напоров в каждом узле схемы основан на законах Кирхгоффа применительно к гидравлическим сетям. Выполнение первого закона Кирхгоффа

дает условие равенства нулю всех расходов по каждому узлу, т. е. должно существовать условие:

$$\sum q_{уз} = 0; \quad (8)$$

Выполнение второго закона Кирхгофа приводит к тому, что сумма потерь напоров по линиям какого-либо кольца при его полном обходе (сумма считается алгебраической) должна быть также равной нулю, т. е. должно осуществляться равенство:

$$\sum_{кол} h = 0. \quad (9)$$

Особенностью данной системы является решение уравнений гидравлики совместно с тепловой задачей, что вносит дополнительные сложности при моделировании системы гарнисажного охлаждения [2, 4, 7].

Выводы

Предложены математические модели для расчета теплотехнических и конструкторских характеристик СКОА. На их основе создана лабораторная установка, на которой подтверждена адекватность этих моделей. В настоящее время идут работы по проектированию СКОА для пилотной установки, находящейся на Западно-Сибирском металлургическом комбинате в г. Новокузнецк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева И. Г. Исследование на математической модели процессов теплопередачи в гарнисажном и пенном слое / И. Г. Васильева, В. П. Цымбал, С. Н. Калашников // Известия вузов. Черная металлургия. 1994. № 12. С. 49-51.
2. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. М.: Горячая линия -Телеком, 2009. 608 с.
3. Иванова В. С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин. М.: Наука, 1994. 383 с.
4. Ключев А. С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования / А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. А. Ключев. М.: Энергоатомиздат, 1989. 368 с.
5. Оленников А. А. Варианты и оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов для агрегатов жидкофазного восстановления / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Известия Вузов. Черная металлургия. 2008. № 6. С. 43-51.
6. Оленников А. А. Утилизация и использование вторичной низкопотенциальной тепловой энергии в металлургических агрегатах / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Современная металлургия начала нового тысячелетия: Труды третьей Международной науч.-техн. конф. Липецк: ЛГТУ, 2006. С. 137-142.
7. Оленников А. А. Программный комплекс для моделирования вариантов утилизации энергии от агрегата типа СЭР / А. А. Оленников, В. П. Цымбал // Системы управления и информационные технологии. 2009. Вып. 2.2(36). С. 277-280.
8. Трубецков Д. И. Введение в теорию самоорганизации открытых систем: учебное издание / Д. И. Трубецков, Е. С. Мчедлова, Л. В. Красичков. М.: Физматлит, 2005. 212 с.

9. Цымбал В. П. Процесс СЭР — металлургический струйно-эмульсионный реактор / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко. М.: Металлургиздат, 2014. 488 с.
10. Цымбал В. П. Струйно-эмульсионный процесс и реактор: Новые возможности для миниметаллургии и машиностроения / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, Р. С. Айзатулов // Электрометаллургия. 2002. № 5. С. 10-18.

REFERENCES

1. Vasil'eva I. G., Tsymbal V. P., Kalashnikov S. N. Issledovanie na matematicheskoj modeli processov teploperedachi v garnisazhnom i pennom sloe [Research on Mathematical Model of Heat Transfer Processes in the Skull and Foam Layer] // Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija [News of Higher Educational Institutions: Iron Industry]. 1994. No 12. Pp. 49-51. (In Russian)
2. Denisenko V. V. Komp'juternoe upravlenie tehnologicheskim processom, jeksperimentom, oborudovaniem [Computer control of the Process, Experiment, Equipment]. M.: Gorjachaja linija — Telekom [Hotline — Telecom]. 2009. 608 p. (In Russian)
3. Ivanova V. S., Balankin A. S., Bunin I. Z. Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and Fractals in Materials Science]. M.: Nauka [Science]. 1994. 383 p. (In Russian)
4. Klyuev A. S., Lebedev A. T., Klyuyev S. A. Naladka sredstv avtomatizacii i avtomaticheskikh sistem regulirovanija [Adjustment of Automation and Automatic Control Systems]. M.: Energoatomizdat. 1989. 368 p. (In Russian)
5. Olennikov A. A., Tsymbal V. P. Varianty i ocenka jeffektivnosti ispol'zovanija vtorichnyh jenergoresursov dlja agregatov zhidkofaznogo vosstanovlenija [Options and Performance Evaluation of Use of Secondary Energy Resources for Liquid-phase Recovery Units] // Izvestija Vuzov. Chernaja metallurgija [News of Higher Educational Institutions: Iron Industry]. 2008. No 6. Pp. 43-51. (In Russian)
6. Olennikov A. A., Tsymbal V. P. Utilizacija i ispol'zovanie vtorichnoj nizkopotencial'noj teplovoj jenerгии v metallurgicheskikh agregatah [Utilization and Usage of Secondary Low-potential Heat Energy in Metallurgical Units] // Sovremennaja metallurgija nachala novogo tysjacheletija: trudy tret'ej Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencsii [Modern Metallurgy of the Beginning of the New Millennium: Proceedings of the Third International Scientific Technical Conference]. Lipetsk: LGTU, 2006. Pp. 137-142. (In Russian)
7. Olennikov A. A., Tsymbal V. P. Programmnyj kompleks dlja modelirovanija variantov utilizacii jenerгии ot agregata tipa SER [Software Package for Modeling Energy Recovery Options from Spray-emulsion Type Unit] // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii [Control Systems and Information Technologies]. 2009. Issue 2.2(36). Pp. 277-280. (In Russian)
8. Trubetskov D. I., Mchedlova E. S., Krasichkov L. V. Vvedenie v teoriju samoorganizacii otkrytyh sistem [Introduction to the Theory of Open System Self-organization]. M.: Fizmatlit, 2005. 212 p. (In Russian)
9. Tsymbal V. P., Motchalov S. P., Rybenko I. A. Process SER — metallurgicheskij strujno-jemul'sionnyj reaktor [Spray-emulsion Process — Metallurgical Spray-emulsion Unit]. M.: Metallurgizdat, 2014. 488 p. (In Russian)
10. Tsymbal V. P., Motchalov S. P., Ayzatulov R. S. Strujno-emul'sionnyj process i reaktor: Novye vozmozhnosti dlja minimetallugii i mashinostroenija [Spray-emulsion Process and Unit: New Opportunities for Mini-metallurgy and Mechanical Engineering] // Jelektrometallurgija [Electrometallurgy]. 2002. No 5. Pp. 10-18. (In Russian)

Авторы публикации

Оленников Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции Сибирского государственного индустриального университета

Оленников Евгений Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Чапаев Денис Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции Сибирского государственного индустриального университета

Широких Андрей Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Института математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета

Authors of the publication

Aleksej A. Olennikov — Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor at the Department of Heatgas Supply and Ventilation, Siberian State Industrial University

Evgenij A. Olennikov — Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor at the Department of Software Support, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Denis B. Chapaev — Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor at the Department of Heatgas Supply and Ventilation, Siberian State Industrial University

Andrej V. Shirokih — Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor at the Department of Information Security of Institute of Mathematics and Computer Science, Tyumen State University