

Факторы проектирования уплотнений шахтных печей с высотой, значительно превышающей диаметр

А.О. Звонов, А.Г. Янишевская, В.Ю. Кобенко, Ф.Н.Притыкин, В.И. Потапов

Омский государственный технический университет, Омск

Аннотация: Описаны основные конструктивные особенности и элементы промышленных шахтных печей. Указано, что одним из нежелательных явлений в шахтной печи является большой градиент температуры по её высоте, в связи с этим проанализированы процессы массопереноса воздуха через различные части печей. Предложены критерии, которые могут быть использованы для исключения подсоса наружного воздуха внутрь печи через её стенки. Результаты могут быть использованы при автоматизации процессов термообработки в рассмотренных печах.

Ключевые слова: электрические печи, термообработка, герметичность, газопроницаемость.

Введение

Шахтные печи используются в металлургической и машиностроительной отрасли, при обжиге извести, для прямого получения железа. В целом различное оборудование для термообработки получает сегодня всё большее распространение в связи с удешевлением материалов и совершенствованием технологий [1]. Для упрощения в данной статье будут рассматриваться только шахтные печи с электрическим нагревом спиральными нагревателями, которые являются более универсальными по сравнению с элементами поверхностного нагрева [2]. Наиболее распространёнными являются печи с открытыми нагревателями и печи с ретортой, показанные на рисунке 1. По сравнению с другими типами печей, шахтные печи обладают рядом существенных преимуществ [3]:

- простота конструкции;
- высокая надёжность;
- экономичность.

Однако они обладают и рядом недостатков:

- сложность обслуживания нагревателей, особенно в печах с ретортой;
- сложность проектирования крышки печи и её примыкания к корпусу.

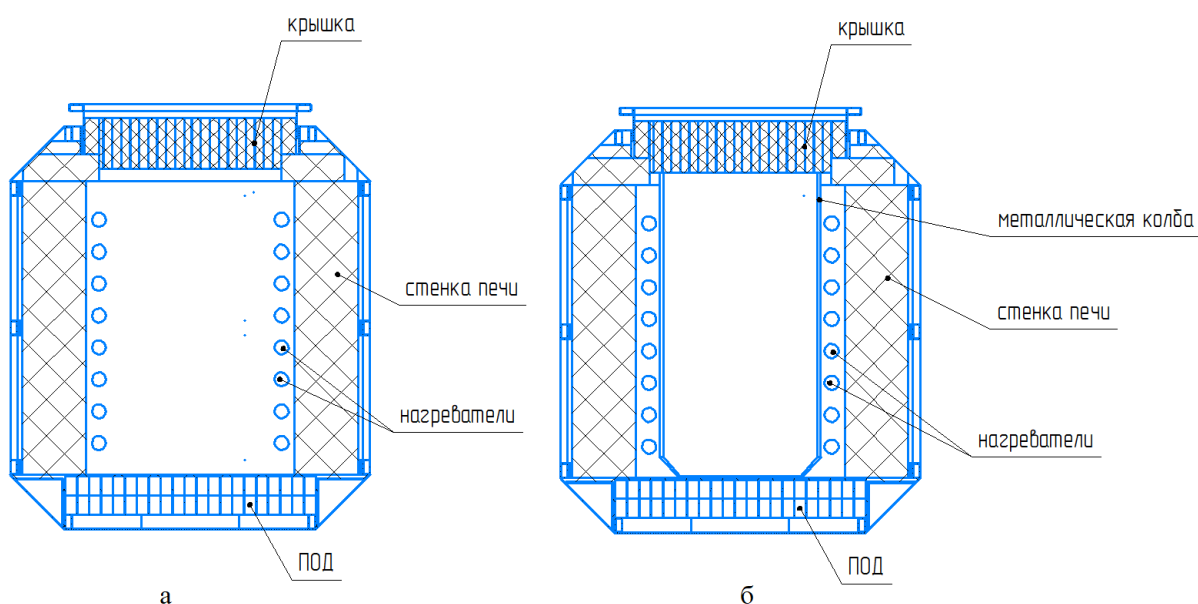


Рис. 1. – Эскиз шахтной печи:
а – с открытыми нагревателями, б – с колбой (ретортой)

Факторы, влияющие на массоперенос воздуха в шахтной печи

Последний из указанных недостатков, а именно сложность проектирования и изготовления примыкания крышки к корпусу, может влиять на работу всей печи, поскольку в процессе её работы нагретый воздух в рабочем пространстве поднимается вверх, и массоперенос воздуха по уплотнению крышки нагревает её металлические поверхности. Это осложняет работу персонала, требует дополнительных мер по отводу тепла из помещения и т.д. При дальнейшем повышении потерь горячего воздуха в верхней части печи, они создают разрежение в нижней части, в свою очередь повышающее массоперенос наружного холодного воздуха через стенку в печь. Таким образом, негерметичность примыкания крышки увеличивает градиент температуры внутри печи, что ухудшает качество получаемой продукции. Если для определённых химических процессов допустим перепад в 10 градусов по внутреннему пространству печи [4], то термическая обработка изделий цветной металлургии и химическая модификация поверхностей металлов могут требовать точности до 3 градусов [5, 6], что

обуславливает необходимость тщательного расчета и привлечения передового опыта технических специалистов.

Для удобства рассмотрим работу каждого из описанных факторов по отдельности.

1. Основным узлом, связанным с герметичностью печи, является примыкание крышка-корпус.

Наиболее распространенным решением конструкции примыкания является песчаный затвор, показанный на рис. 2.

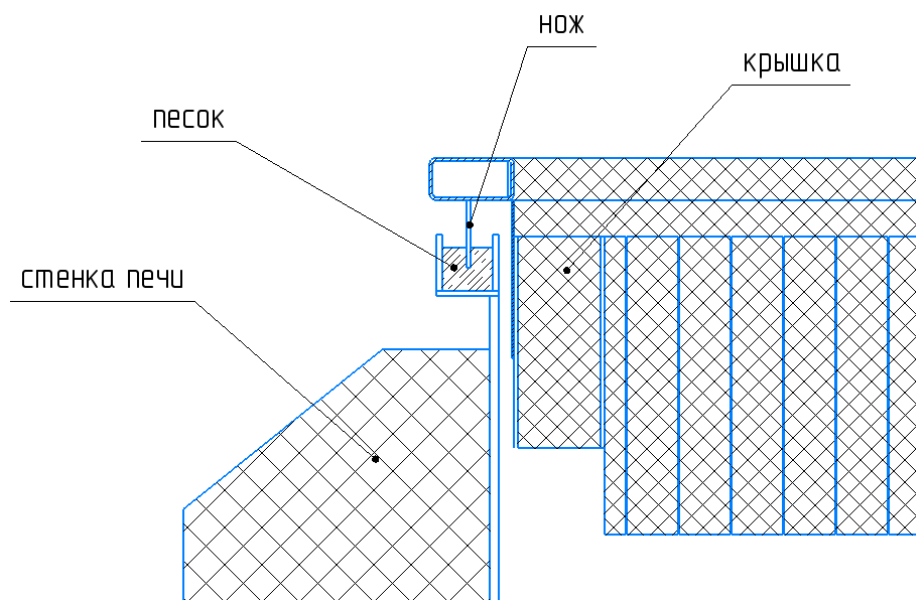


Рис. 2 – Крышка печи с песчаным затвором

Хорошо известны как преимущества (простота, относительно высокая степень герметичности), так и недостатки данного решения:

- повышенный расход металла и трудоемкость сборки песчаного лотка и ножа;
- пыление;
- значительный нагрев наружной поверхности ножа;
- сравнительно небольшая надежность: к значительному снижению герметичности может привести множество случайных и независимых

факторов, к примеру перекося крышки при установке, попадание мусора или более крупных частиц песка под нож, абсорбция песком влаги.

Хотя рассматриваемые далее формулы могут быть применены и для печей с песчаным затвором при введении соответствующих коэффициентов, авторами рассматривалась исключительно конструкция примыкания, показанная на рисунке 3. Как видно из рисунка, уплотняющим элементом является керамическое волокно.

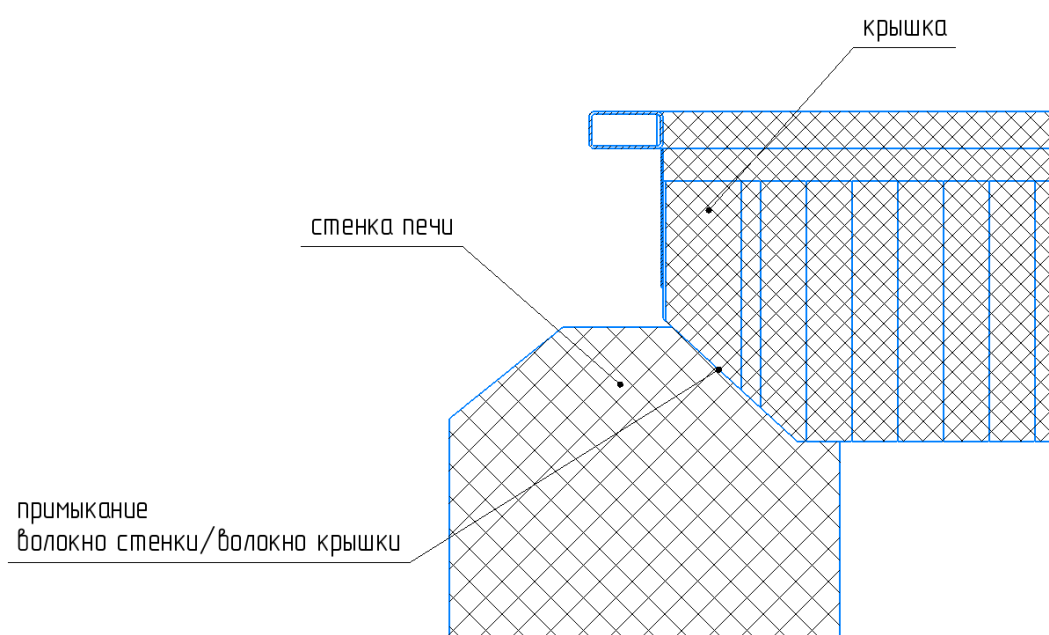


Рис. 3. – Крышка печи с керамическим волокном

Преимущества такого решения:

- снижение номенклатуры применяемых в печи материалов;
- снижение стоимости за счет исключения лотка, ножа и песка;
- меньшая вероятность перекося крышки;
- возможность регулировки герметичности регулировкой степени обжатия волокна.

В целом газопроницаемость уплотнения можно выразить как

$$G = \frac{V}{A \cdot t} = \frac{k \Delta P A}{\mu L} \cdot \frac{1}{A \cdot t}, \quad (1)$$

где G – газопроницаемость, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; V – объём газа, м^3 ; A – площадь, м^2 ; t – время, ч; k – коэффициент газопроницаемости, м^2 ; ΔP – перепад давления, Па; μ – вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; L – толщина образца, м.

В ГОСТ (к примеру, ГОСТ 2138-91, ГОСТ 23409.6-78) чаще всего применяются условные единицы или $\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}$, однако единица $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ является более интуитивно понятной.

Физический смысл единиц:

1. $\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}$ – это коэффициент газопроницаемости, показывающий способность материала пропускать газ;
2. $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ – объём газа, проходящего через единицу площади за единицу времени.

Для перевода из $\text{м}^2/\text{Па} \cdot \text{с}$ в $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, необходимо исходное значение умножить на 3600.

Массоперенос через примыкание опишем следующим уравнением:

$$M_k = G_1' \cdot 2\pi r h, \quad (2)$$

где M_k – количество диффундирующего через уплотнение крышки воздуха в час, кг; G_1' – приведенная газопроницаемость материала уплотнения крышки, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; r – радиус окружности средней линии уплотнения, м; h – высота зазора, перекрываемого уплотнением, м.

2. Существенное влияние на массоперенос внутри печи также оказывает герметичность её стенок. Это справедливо как для печей с кирпичной футеровкой, где в процессе эксплуатации неизбежно появляются трещины [7], так и для печей с футеровкой из волокнистых материалов, всегда имеющих некоторый коэффициент газопроницаемости. По аналогии с формулой (2) можно записать формулу для массопереноса через стенки:

$$M_w = G_2' \cdot 2\pi R H, \quad (3)$$

где M_w – количество диффундирующего через стенки воздуха в час, кг; G_2' – приведенная газопроницаемость материала стенок, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; R – радиус

окружности средней линии стен печи, м; H – высота внутреннего пространства печи, м.

Анализ массопереноса воздуха в печи в целом

Далее проанализируем, как первый и второй фактор одновременно влияют на работу печи. Нагрев воздуха в печи вызывает его расширение. При наличии негерметичности по примыканию крышки, горячий воздух под действием избыточного давления проходит через примыкание крышки наружу, кроме того он проходит и через стенки печи. Однако промышленные печи как правило работают при значительных температурах (600 °C и выше) [8] и весь столб воздуха в печи имеет плотность в 4-5 раз меньшую, чем аналогичный столб атмосферы. При значительной негерметичности примыкания крышки, избыточного давления в печи уже не создаётся, и может возникнуть тяга по аналогии с дымоходом – воздух будет не выходить через стенки, а проникать через них внутрь печи и выходить в верхней части. Как указано выше, это будет крайне негативно сказываться на качестве получаемой в печи продукции.

Первое условие возникновения такого эффекта также уже названо, это положительная разница между скоростью повышения давления в печи (запишем его из закона Гей-Люссака) и скоростью выхода газов через негерметичное уплотнение (по формуле (2)):

$$\alpha V_0 \Delta T' < G_1' \cdot 2\pi r h, \quad (4)$$

где α – коэффициент объемного теплового расширения газа; V_0 – начальный объем, м³; $\Delta T'$ – скорость изменения температуры, К/ч.

Вторым условием, необходимым для втягивания наружного воздуха в печь, является негерметичность её стенок. Формула (3) позволяет рассчитать массоперенос как из печи, так и в обратную сторону. В соответствии с законом Архимеда, наибольшее разрежение, втягивающее наружный воздух

в печь, достигается снизу, где высота вышележащих столбов с разной плотностью максимальна:

$$\Delta p = \Delta \rho g \Delta h, \quad (5)$$

где Δp – разность давлений, кг/м²; $\Delta \rho$ – разность плотностей, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Δh – разность высот, м.

Таким образом, второе условие связано с высотой печи и проявляется тем сильнее, чем выше её высота относительно диаметра. Вместо дальнейших преобразований представим степени негерметичности стенок и уплотнения крышки как коэффициенты сопротивления потоку на «входе» и «выходе» из печи: k_1 и k_2 .

В этом случае для нахождения величины тяги можно воспользоваться известной формулой для расчета выбросных труб с учетом аналогичных коэффициентов сопротивления на входе и выходе из трубы:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+k_1+k_2}}, \quad (6)$$

где Q – объемный расход воздуха, м³/с; C – безразмерный коэффициент сопротивления потоку в сечении печи; A – площадь сечения печи, м².

Автоматизация термообработки с учетом описанных факторов

Применяемые на практике режимы термообработки как правило являются ступенчатыми и включают в себя шаги нагрева, выдержки и медленного охлаждения [9]. В условиях массового производства служба технологов физически не может контролировать загрузку всех заготовок на термообработку, и загрузку осуществляет только рабочий-термист. В таком случае наиболее удобным вариантом автоматизации является загрузка готового режима по номеру, либо его автоматический подбор исходя из массы заготовки и марки материала, что является легкой задачей для современных промышленных микроконтроллеров [10].

Исходя из проведенного анализа, в качестве критериев применимости рассчитанного или введенного в программу техпроцесса может быть использовано неравенство (4), ограничивающее максимальную скорость увеличения температуры в печи. Уравнение (6) же должно быть использовано на этапе разработки печи, либо учитываться при её приёмке заказчиком.

Заключение

Проектирование уплотнений печей с учетом описанных факторов значительно повысит качество проектирования и снизит процент бракуемой продукции. Кроме того, приведенные соотношения между физическими величинами могут быть использованы для корректировки технологических процессов, либо для автоматического сигнализирования о возможном подсосе воздуха в печь.

Литература

1. Нижегородов А.И. Оценка эффективности по коэффициентам полезного действия энергетических блоков новой электрической модульно-пусковой печи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. № 3 (152). С. 514-526.
2. Сысоев А.К. Эффективность применения гибких поверхностных нагревательных элементов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4028.
3. Voermann, N. et al. Project Implementation Best Practices for Metallurgical Furnace Rebuilds and Upgrades. In: Metallurgy and Materials Society of CIM (eds) Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_161.
4. Makarov, V.N., Akhmetov, R.G., Davydov, S.Y. et al. Research and Simulation of Environmental Efficiency of Drying Refractory and Construction

Materials in Vertical Shaft Furnaces // Refract Ind Ceram. 2023. №64. pp. 454–461 doi.org/10.1007/s11148-024-00870-0.

5. Александров А.А. Прогнозирование остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3367 .

6. Pousette, H., Kojola, N. & Hessling, O. Reduction and Carburization Mechanisms for CO + H₂ Reduction in Shaft Furnace Conditions // Metall Mater Trans B. 2024. № 55. pp. 4257–4270. doi.org/10.1007/s11663-024-03235-7.

7. Силаев В.А. Конструкторская модернизация шахтной печи азотирования // Сборник статей XI Международной научно-практической конференции «Молодой исследователь 2025». Пенза. 2025. С. 25-30.

8. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных термических печей. М.: Теплотехник, 2004. 396 с.

9. Манаков Н.А., Шашкова Л.В., Ерёмин А.М. Влияние режимов термообработки на активационные характеристики деформации и разрушения диффузионно-активируемой водородом стали // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности». Бийск. 2024. С. 97-102.

10. Пьявченко А.О., Переверзев В.А. Архитектура, основы программирования и применения AVR-микроконтроллеров и ARM-микросистем. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2019. 374 с.

References

1. Nizhegorodov A.I. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. № 3 (152). pp. 514-526.

2. Sysoev A.K. Inzenernyj vestnik Dona. 2017. № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4028.
3. Voermann, N. et al. Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_161.
4. Makarov, V.N., Akhmetov, R.G., Davydov, S.Y. et al. Refract Ind Ceram. 2023. №64. pp. 454–461 doi.org/10.1007/s11148-024-00870-0.
5. Aleksandrov A.A. Inženernyj vestnik Dona. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3367.
6. Pousette, H., Kojola, N. & Hessling, O. Metall Mater Trans B. 2024. № 55. pp. 4257–4270. doi.org/10.1007/s11663-024-03235-7.
7. Silaev V.A. Sbornik statey XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molodoy issledovatel' 2025» [Proc. of XI International conference “Young Researcher 2025“]. Penza. 2025. pp. 25-30.
8. Gusovskiy V.L., Lifshits A.E. Metodiki rascheta nagrevatel'nykh termicheskikh pechey [Methods of heating thermal furnaces calculation]. M.: Teplotekhnika, 2004. 396 p.
9. Manakov N.A., Shashkova L.V., Erjomin A.M. Materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Tehnologii i oborudovanie himicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishhevoj promyshlennosti». Bijsk. 2024. pp. 97-102.
10. P'javchenko A.O., Pereverzev V.A. Arhitektura, osnovy programmirovaniya i primeneniya AVR-mikrokontrollerov i ARM-mikrosistem [Architecture, programming basics and application of AVR microcontrollers and ARM microsystems]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2019. 374 p.

Дата поступления: 8.09.2025

Дата публикации: 28.10.2025