

УДК 621.78

Исследование влияния пористости и типа контейнера на температурное поле нагреваемых садов

М.Г. Сулейманов, В.В. Бухмиров
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В машиностроении распространен нагрев садов, образованных большим количеством одинаковых изделий, которые располагаются насыпью в контейнерах. В топливных печах снижение времени нагрева и, соответственно, энергоресурсов осуществляется организацией протекания продуктов сгорания через пористую садку в перфорированном контейнере. Литературные источники не позволяют сделать однозначные выводы о влиянии пористости и типа контейнера на температурное поле садки при ее нагреве в электрической печи, в которой преобладает радиационный теплообмен. В связи с этим исследование влияния пористости и перфорации контейнера на температурное поле садки при ее нагреве в электропечи является актуальной задачей.

Материалы и методы: Экспериментальное исследование нагрева пористых садов в электрической камерной печи выполнено для трех значений пористости садки в трех типах контейнеров, отличающихся перфорацией стенок. В качестве материала садов использованы стандартные метизные изделия.

Результаты: Получены температурные поля нагреваемых садов разной пористости в зависимости от типа контейнера. Установлено, что данные эксперимента качественно совпадают с литературными данными по нагреву садов в топливных печах.

Выводы: В результате проведенного эксперимента получена информация о влиянии пористости и типа контейнера на нагрев садов в электрической печи: температурные поля садов с низкой пористостью не зависят от типа используемого контейнера; нагрев высокопористых садов в контейнерах с большой перфорацией приводит к росту температуры поверхности садки и росту перепада температур по ее сечению, для снижения которого необходима организация принудительной конвекции в рабочем пространстве электрической печи. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации существующих режимов нагрева насыпных садов.

Ключевые слова: экспериментальное исследование; нагрев металла; теплообмен; насыпные садки; камерная электрическая печь; теплопроводность; пористое тело; фильтрация; оптимизация режимов; температурный график.

Experimental study of the effect of porosity and type of container on the porous charge heating

M.G. Suleymanov, V.V. Bukhmirov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Abstract

Background: Heating the batch formed by a large number of identical products arranged in bulk in containers is widely used in mechanical engineering. In furnaces, fuel consumption and heating time can be decreased by combustion filtration through a porous charge placed in a perforated container. Literary sources do not allow us to make conclusions about the effect of porosity and container type on the thermal field of the porous batch when it is heated in an electric furnace, in which the radiation heat transfer is dominant. In this regard, the study of the effect of porosity and perforation of the container on the metal heating in an electric furnace is an urgent problem.

Materials and methods: The experimental study of porous batch heating in the electric furnace was done for three different porosity values in three types of containers with different wall perforation. And we used standard industrial hardware products as the porous batch material.

Results: We have obtained temperature fields of the heated load with different porosity values depending on the container type and have found that the results agree qualitatively with the experimental data from literature.

Conclusions: As a result of our experiment, we have obtained information about the effect of porosity and container type on porous batch heating. We can conclude that the temperature field of the batch with low porosity does not depend on the container type. Heating of a high-porous batch in a large perforated container leads to an increase in the surface temperature and growth of the temperature difference on its cross section. For even heating in an electric furnace it is necessary to organize forced filtering of air in the workspace. The results can be used to optimize the existing heating modes.

Key words: experimental research, metal heating, heat exchange, bulk load, chamber furnace, thermal conductivity, porous body, filtration, mode optimization, temperature graph.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.5.005-010

Введение. В машиностроительной промышленности распространен нагрев садок, образованных изделиями различной номенклатуры. Пористые садки часто неоднородны и имеют разную структуру, поэтому для повышения качества выпускаемой продукции необходимо выдерживать заданные температурные режимы нагрева вне зависимости от геометрических свойств каждой садки.

Исследования нагрева пористых тел [1, 2] показали, что интенсификация теплообмена возможна за счет увеличения пористости тела, при этом эффективный коэффициент теплопроводности в большей степени зависит от типа пор (закрытые или открытые), чем от их формы и расположения. В [2] также установлено, что с увеличением пористости возрастает доля радиационного теплообмена в переносе теплоты внутри пористого материала.

Для снижения затрат энергии на нагрев в газовых печах организуется фильтрация продуктов сгорания через пористую садку, что позволяет снизить время пребывания металла в печи за счет повышения конвективной составляющей теплоотдачи от продуктов сгорания к садке и увеличения эффективного коэффициента теплопроводности. В результате данного исследования¹ [3, 4] изучено влияние фильтрации газа на температурное поле пористой садки.

Для оценки возможности оптимизации режимов нагрева насыпных садок в электрической печи, в которой отсутствует вынужденная конвекция воздуха, был выполнен эксперимент по исследованию влияния пористости садки и типа контейнера на температурное поле нагреваемой садки.

Материалы и методы. Экспериментальная установка. Эксперимент выполнен в камерной лабораторной печи сопротивления СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2. Данная печь разработана для нагрева и термической обработки материалов при температурах до 1100 °С. Номинальная мощность печи – 3 кВт. Схема печи представлена на рис. 1. Печь состоит из металлического корпуса 1 и нагревателей 3, расположенных на верхней, нижней и боковых стенках рабочей камеры. На передней и задней стенках печи нагреватели отсутствуют. Рабочее про-

странство электропечи образовано разъемными керамическими фасонами. Пространство между фасонами и корпусом заполнено теплоизоляцией. В нижней части установлена пусковая и контрольно-регулирующая аппаратура 4.

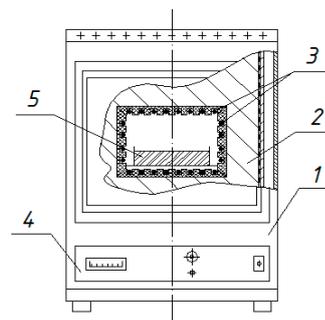


Рис. 1. Схема печи: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – нагреватель; 4 – блок управления; 5 – нагреваемая садка

В качестве опытного материала пористой садки были использованы метизные изделия – гайки и шайбы, а также металлическая стружка для высокопористой садки.

Пористость насыпной садки определена по объему жидкости, вошедшей в поровое пространство [5]:

$$f = V_1 / V_2,$$

где V_1 – объем жидкости, м³; V_2 – объем контейнера, м³.

В качестве жидкости, заполняющей поры, была использована дистиллированная вода.

Садки нагревались в прямоугольных контейнерах трех типов с одинаковыми геометрическими размерами 150x100x40 мм:

- сплошной контейнер, выполненный из стали марки 08 с толщиной стенок 1 мм;
- перфорированный контейнер – контейнер с отверстиями на дне диаметром 8 мм в количестве 40 штук;
- сетчатый контейнер, стенки которого сделаны в виде сетки из проволоки толщиной 1 мм с ячейками 5x5 мм.

Контейнеры устанавливались в печи на направляющие высотой 5 мм.

Проведение эксперимента. Были проведены эксперименты для трех значений пористости садки ($f = 0,21$, $f = 0,48$ и $f = 0,63$) и трех типов контейнеров. Садки загружали в печь при комнатной температуре и нагревали 8 часов.

Температуры рабочего пространства печи и в контрольных точках садки измерялись хромель-алюмелевыми термопарами в стекловолоконной изоляции. Предел измерений используемых термопар ТХА –

¹ Крылова О.Б. Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садок: дис. ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1988. –185 с.

1100 °С, предел использования (температура плавления изоляции) – 900 °С. Схема расположения термопар в контейнере представлена на рис. 2.

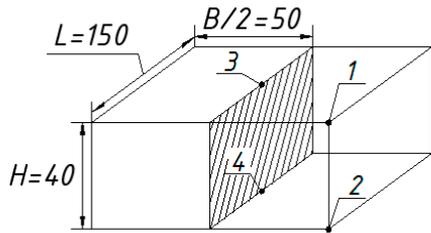


Рис. 2. Схема расположения термопар в контейнере

Для измерения термо-ЭДС был использован универсальный цифровой вольтметр GW Intek GDM-8145 с погрешностью измерений 0,1 %. Контроль за напряжением, подаваемым на нагреватели, осуществлялся при помощи цифрового мультиметра MastechMY68 [3].

Качество нагрева определяется максимально допустимым перепадом температур по сечению садки и отсутствием местного пережога металла [4], поэтому для измерения были выбраны точки с максимальными и минимальными значениями температур. Перепад температур должен составлять минимально возможное значение и определяется длительностью процесса выдержки, однако для минимизации времени и затрат на нагрев металла величина допустимого перепада задается технологической картой.

Результаты. Значения температур в контрольных точка садки в конце нагрева представлены в табл. 1 для различных контейнеров и пористости садки.

Таблица 1. Температуры в контрольных точках в конце нагрева в сплошном контейнере, °С

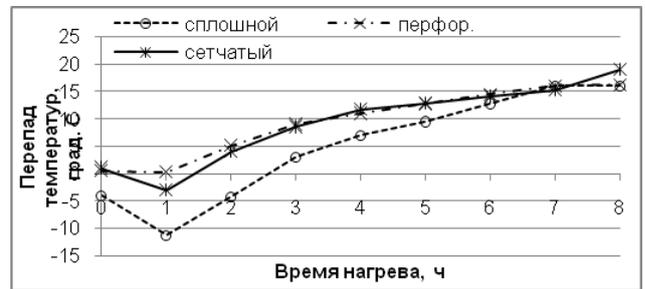
Контрольная точка	Пористость		
	$f = 0,21$	$f = 0,48$	$f = 0,63$
Сплошной контейнер			
T1	291,5	309,5	291,5
T2	291	314	292
T3	307,5	317	314
T4	308,5	315	309
Перфорированный контейнер			
T1	296,8	291,5	292,5
T2	291,5	308	294
T3	313	314,2	319
T4	312	315,5	314,2
Сетчатый контейнер			
T1	296,07	294	295
T2	291,41	297,2	305
T3	314,96	314	329,5
T4	313,96	309,5	326

Увеличение перфорации контейнера приводит к увеличению перепада температур в конце нагрева садки. Для более рав-

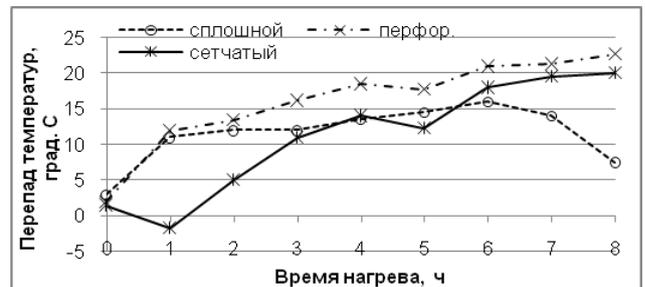
номерного нагрева рекомендуется принудительная фильтрация в пористой садке.

В результате опытов были определены точки, между которыми перепад температур составил наибольшее значение: для садки с пористостью $f = 0,21$ – точки 2 и 3; для садок с пористостью $f = 0,48$ и $f = 0,63$ – точки 1 и 3. Изменение перепада температур в точках 1 и 3 представлено на рис. 3 для различной пористости садки.

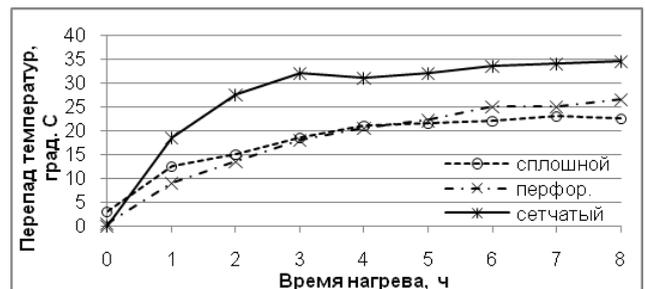
В течение первого часа нагрева садки с пористостью $f = 0,21$ в сетчатом контейнере температура в точке 1 выше, чем в точке 3 на 11,3 °С. Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что перепад температур между точками 1 и 3 в конце нагрева для садки с пористостью $f = 0,21$ не зависит от типа используемого контейнера. Для садки с пористостью $f = 0,63$ использование контейнера с высокой перфорацией (сетчатого контейнера) приводит к увеличению перепада температур в конце нагрева.



а)



б)



в)

Рис. 3. Перепад температур Т3–Т1: а – $f = 0,21$; б – $f = 0,48$; в – $f = 0,63$

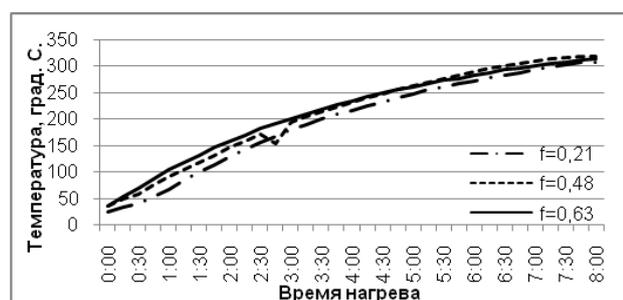
Значения перепада температур между точками 1 и 3 в конце нагрева представлены в табл. 2.

Таблица 2. Перепад температур в конце нагрева, °С

Тип контейнера	Пористость		
	$f = 0,21$	$f = 0,48$	$f = 0,63$
Сплошной	16	7,5	22,5
Перфорированный	16,2	20	26,5
Сетчатый	18,89	22,7	34,5

Увеличение перепада температур по сечению садки с ростом пористости объясняется снижением эффективного коэффициента теплопроводности.

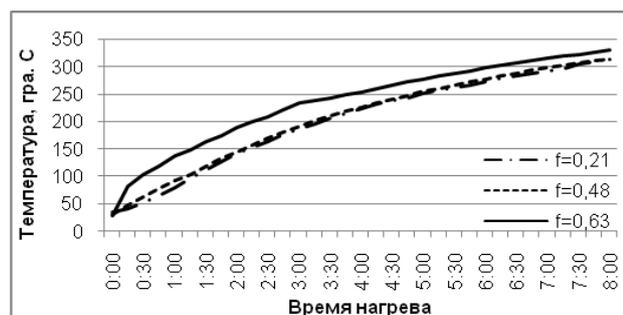
Для контрольной точки 3 (точка с наиболее высокой температурой в конце нагрева) на рис. 4 показаны графики изменения температуры при нагреве садок в разных контейнерах.



а)



б)



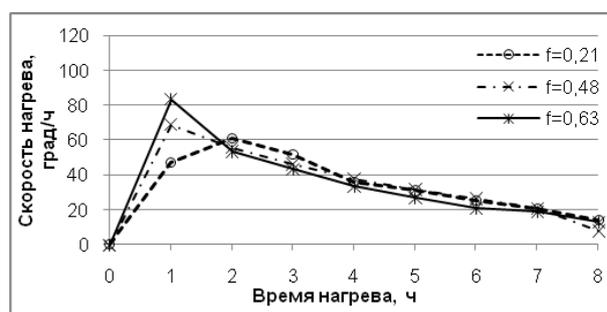
в)

Рис. 4. Изменение температуры в точке Т3: а – сплошной контейнер; б – перфорированный контейнер; в – сетчатый контейнер

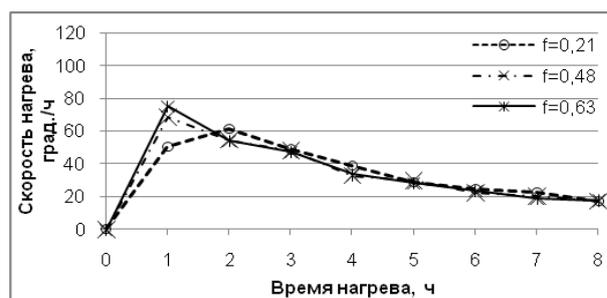
Анализ зависимостей (рис. 4) показывает, что режимы нагрева в сплошном и перфорированном контейнерах практически совпадают, а в сетчатом контейнере с увеличением пористости температура поверхности садок в точке 3 на 6 % выше, чем в сплошном и перфорированном контейнерах. Графики температур аналогичны графикам нагрева садки в топливных печах².

Увеличение производительности печи возможно за счет повышения скорости нагрева и, соответственно, сокращения времени пребывания металла в печи. Максимальная скорость нагрева определяется допустимыми значениями термических напряжений в заготовках.

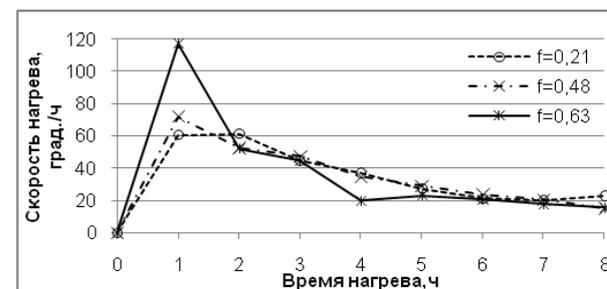
Скорость нагрева садки в точке 3 для различной пористости и разных контейнеров представлена на рис. 5.



а)



б)



в)

Рис. 5. Скорость нагрева в точке Т3: а – сплошной контейнер; б – перфорированный контейнер; в – сетчатый контейнер

² Крылова О.Б. Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садок: дис. ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1988. –185 с.

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что скорость нагрева садки в точке 3 в течение первого часа для сетчатого контейнера больше, чем для садок в других типах контейнеров. Скорость нагрева садки с пористостью $f = 0,21$, $f = 0,48$ и $f = 0,63$ в сетчатом контейнере в первый час составила 60 град/ч, 71,8 град/ч и 117 град/ч при среднем значении 36,87, 36,75 и 38,69 град/ч соответственно.

Выводы

В результате выполненного экспериментального исследования нагрева насыпных садок разной пористости в трех типах контейнеров, отличающихся перфорацией стенок, установлено, что увеличение перфорации контейнера и увеличение пористости приводят к росту перепада температур по сечению садки при нагреве в электрической печи, в которой преобладает радиационный теплообмен.

В связи с этим для снижения скорости нагрева высокопористой садки в начальный период термообработки необходимо увеличить эффективный коэффициент теплопроводности за счет принудительной циркуляции воздуха в садке.

Список литературы

1. **Calculations** of the Thermal Conductivity of Porous Materials / T. Fiedler, E. Pesetskaya, A. Öchsner, J. Grácio // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 514–516. – P. 754–758.
2. **Moran Wang, Ning Pan.** Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – P. 1325–1331.
3. **Гусенкова Н.П., Крылова Л.С., Коротин А.Н.** Математическое моделирование температурного поля пористого тела с фильтрацией // Межвуз. сб. науч. тр.

Сулейманов Муса Гусейнович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант, математик кафедры теоретических основ теплотехники,
e-mail: smusag@mail.ru
Suleymanov Musa Guseinovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-graduate student, Mathematician of the Department of Heat Engineering Theory,
e-mail: smusag@mail.ru

Бухмиров Вячеслав Викторович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники,
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

«Моделирование теплофизических процессов и вопросы энергосбережения в теплотехнологии». – Иваново, 2000. – С. 13–20.

4. **Экспериментальное** исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки / Г.А. Перевезенцев, В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, А.Е. Потехин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 37–41

5. **Фандеев В.П., Самохина К.С.** Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Т. 7, № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf>, свободный. Загл. с экрана.

References

1. Fiedler T., Pesetskaya E., Öchsner A., Grácio J. Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials. Materials Science Forum, 2006, vol. 514–516, pp. 754–758.
2. Moran, Wang, Ning, Pan. Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, vol. 51, pp. 1325–1331.
3. Gusenkova, N.P., Krylova, L.C, Korotin, A.N. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo polya poristogo tela s fil'tratsiyey [Mathematical modeling of temperature field of the porous body with filtration]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov i voprosy energosberezheniya v teplotekhnologii»* [International collection of scientific works «Modelling of thermophysical processes and problems of energy saving in heat technologies»]. Ivanovo, 2000, pp. 13–20.
4. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B., Potekhin, A.E. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya fil'tratsii na temperaturnoe pole nasypnoy sadki [Experimental study of the effect of filtering on the temperature field of bulk cages]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 37–41.
5. Fandeyev, V.P., Samokhina, K.S. Metody issledovaniya poristyykh struktur [Methods of studying porous structures]. *Internet-journal «NAUKOVEDENIE»*, 2015, vol. 7, no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf>

Bukhmirov Vyacheslav Viktorovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Head of the Department of Heat Engineering Theory,
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru