

УДК 624.365

Экспериментальное исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки

Г.А. Перевезенцев, В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, А.Е. Потехин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mkandy@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Совершенствование теплообмена в термических садочных печах приводит к экономии топлива и повышению энергетической эффективности теплотехнологических процессов. В термических печах машиностроительного производства распространен нагрев насыпных садок, образованных большим количеством мелких изделий. Интенсифицировать процесс нагрева насыпной садки можно за счет организации фильтрации газов через садку. Теоретическому исследованию влияния фильтрации на режим нагрева металла посвящены работы Л.А. Бровкина, А.У. Пуговкина, Л.С. Крыловой, Н.П. Гусенковой. Практический интерес представляют экспериментальные исследования фильтрации теплоносителя через садку, позволяющие выявить оптимальные режимы нагрева.

Материалы и методы: В качестве материала для исследования использованы насыпные садки, сформированные из изделий различной номенклатуры. Процесс нагрева насыпной садки с учетом организации фильтрации газа осуществлен в лабораторной нагревательной печи. Нахождение оптимального режима нагрева садки проведено экспериментальным способом путем изменения скорости фильтрации воздуха в диапазоне от 0,3 до 1,5 м/с.

Результаты: Представлены результаты серии опытов по нагреву насыпных садок. Рассчитаны их энергетические балансы. Выявлены оптимальные режимы. Получена полиномиальная зависимость удельных энергетических затрат от массового расхода воздуха. Установлено, что интенсификация нагрева насыпных садок возможна за счет организации фильтрации газа через садку, на эффективность процесса оказывает влияние скорость фильтрации.

Выводы: Полученные результаты позволяют получить оптимальные режимные параметры нагрева пористых садок в термических нагревательных печах за счет организации фильтрации газа через садку.

Ключевые слова: насыпная садка, экспериментальное исследование, тепловой баланс, интенсификация нагрева, пористость, фильтрация, режимные параметры, эффективность нагрева.

Experimental study of filtration influence on temperature field of bulked batch

G.A. Perevezentsev, V.A. Gorbunov, O.B. Kolibaba, A.E. Potekhin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mkandy@mail.ru

Abstract

Background: Improving heat transfer in thermal batch furnaces leads to fuel saving and higher energy efficiency of thermal technological processes. Thermal furnaces of machinery production often use the method of heating bulked batch consisting of a large number of small metal details. The bulked batch heating can be intensified through gas filtering in the batch. The problem of filtration influence on metal heating mode has been the subject of theoretical works by L.A. Brovkin, A.U. Pugovkin, L.S. Krylova, N.P. Gusenkova. Of practical importance are also experimental studies of coolant filtration through the batch that reveal the optimal heating modes.

Materials and methods: Bulked batches containing various nomenclature metal details were used as the material for studies. The metal heating process was carried out in a laboratory heating furnace, with the gas filtration organization taken into account. The optimal bulked batch heating mode was found experimentally by changing the speed of air filtration in the range 0,3–1,5 m/s.

Results: The paper represents the results of a series of experiments on bulked batch heating and their energy balance calculations. The study has determined the optimal heating modes and a polynomial dependence of specific energy consumption on mass air flow. It has also been found that bulked batch heating can only be intensified by filtering gas through the batch, with the speed of filtration playing a significant role in the process efficiency.

Conclusions: The obtained results prove that it is possible to achieve optimal heating parameters of porous batches in thermal furnaces by filtering gas through the batches.

Key words: bulked batch, experimental study, heat balance, heating intensification, porosity, filtration, mode parameters, heating efficiency.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.037-041

Нагревательные и термические печи являются основным звеном металлообрабатывающей, машиностроительной и других отраслей промышленности. Термическая обработка металлов производится для улучшения их структуры и придания заданных свойств (прочности, твердости, износоустойчивости и т. п.). Тепловые процессы термической обработки металлов состоят из последовательных циклов, включающих нагрев металла до заданной температуры печи, охлаждение с различными скоростями до заданной температуры и другие операции. Термообработка – одна из самых длительных и энергоемких стадий в производстве различных изделий. Совершенствование процессов нагрева металла в термических печах, оценка и увеличение эффективности их работы являются главным источником резервов для экономии топлива и энергии.

При термообработке мелких изделий, загружаемых в печь, образованная ими садка получила название насыпной садки [1]. В расчетах процессов нагрева насыпной садки ее можно рассматривать как условное изотропное пористое тело, характеризующееся порозностью, т.е. отношением объема пор к объему металла.

Одним из эффективных способов интенсификации процессов теплообмена в насыпной садке является организация фильтрации газов через садку [2]. Проникновение греющих газов между изделиями обеспечивает более быстрый и равномерный их прогрев и приводит в конечном итоге к снижению времени пребывания металла в печи.

В задачу данного исследования входило изучение влияния фильтрации газа на процесс нагрева насыпной садки в лабораторных условиях.

Целью исследования являлись экспериментальное определение температурного поля насыпной садки при различных режимах фильтрации и оценка энергетической эффективности нагрева садки на основе теплового баланса рабочего пространства печи.

В ходе лабораторного эксперимента (рис. 1) в рабочее пространство предварительно разогретой до 1000 °С камерной электрической печи СНОЛ 36/14 помещали насыпную садку в металлическом контейнере.

Контейнер (рис. 2, д) представляет собой открытый сверху прямоугольный параллелепипед с размерами 0,1×0,1×0,25 м, в нижней грани которого для организации фильтрации располагались отверстия диаметром 10 мм с шагом 20 мм. Подача предварительно подогретого воздуха осуществлялась через входное отверстие диаметром 20 мм со скоростями $\omega_1 = 0,3$ м/с, $\omega_2 = 1$ м/с и $\omega_3 = 1,5$ м/с.

В ходе эксперимента при помощи термопар типа ТХА фиксировались температуры в 4-х характерных точках садки (рис. 3), а также температура печи. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль МВА-4 и далее обрабатывался на компьютере. Скорость и расход воздуха измерялись при помощи дифференциального цифрового манометра ДМЦ-01М. Суммарная погрешность измерения температуры, определенная по ГОСТ Р.8.585–2001, составила $\pm 7,87^\circ\text{C}$.

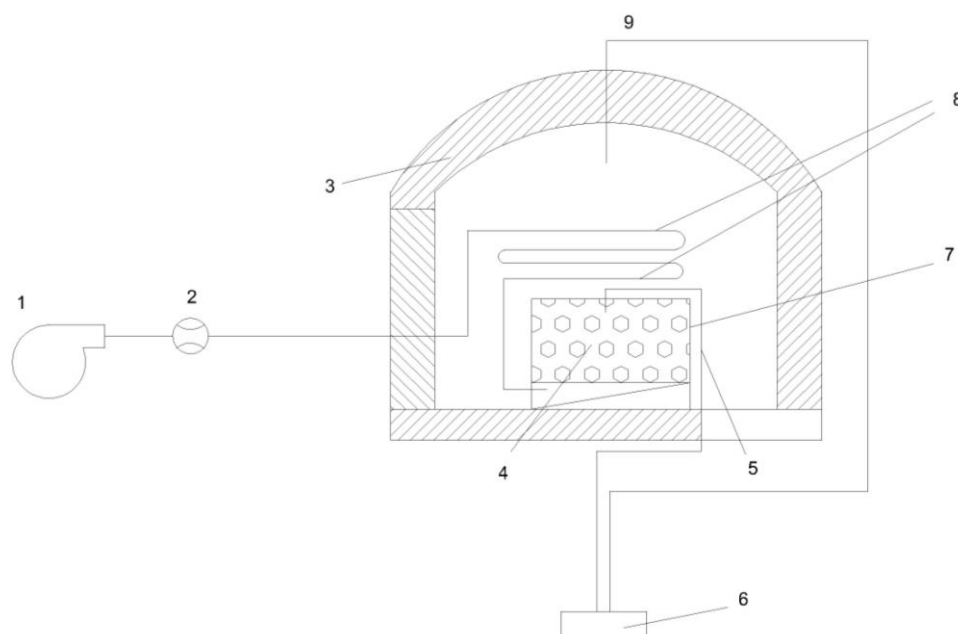


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – дутьевой вентилятор; 2 – цифровой дифманометр ДМЦ 01М; 3 – обмуровка печи; 4 – садка; 5 – термопара; 6 – аналоговый модуль МВА-4; 7 – контейнер; 8 – подогреватель; 9 – термопара печи

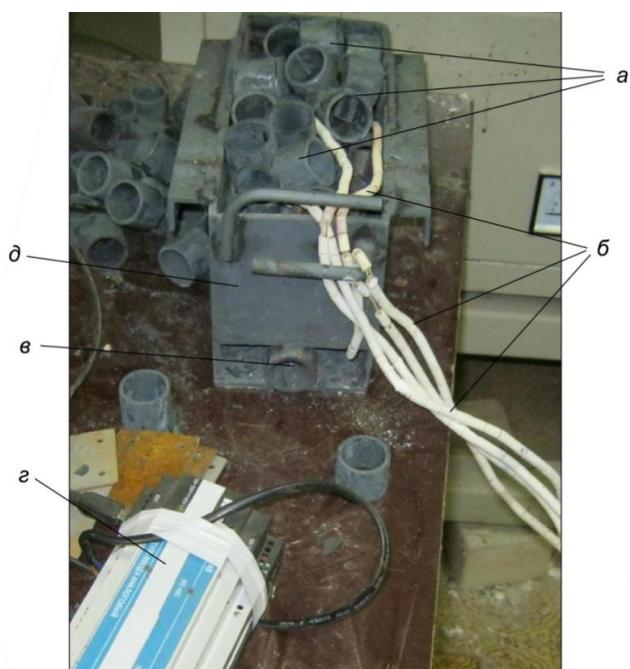


Рис. 2. Опытная садка: а – нагреваемая садка; б – термопары ТХА; в – входное отверстие для организации дутья; г – аналоговый модуль ввода МВА-4; д – контейнер

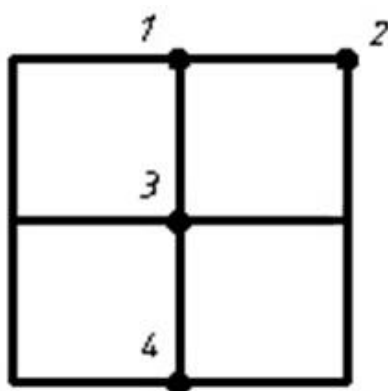


Рис. 3. Точки замера температуры садки

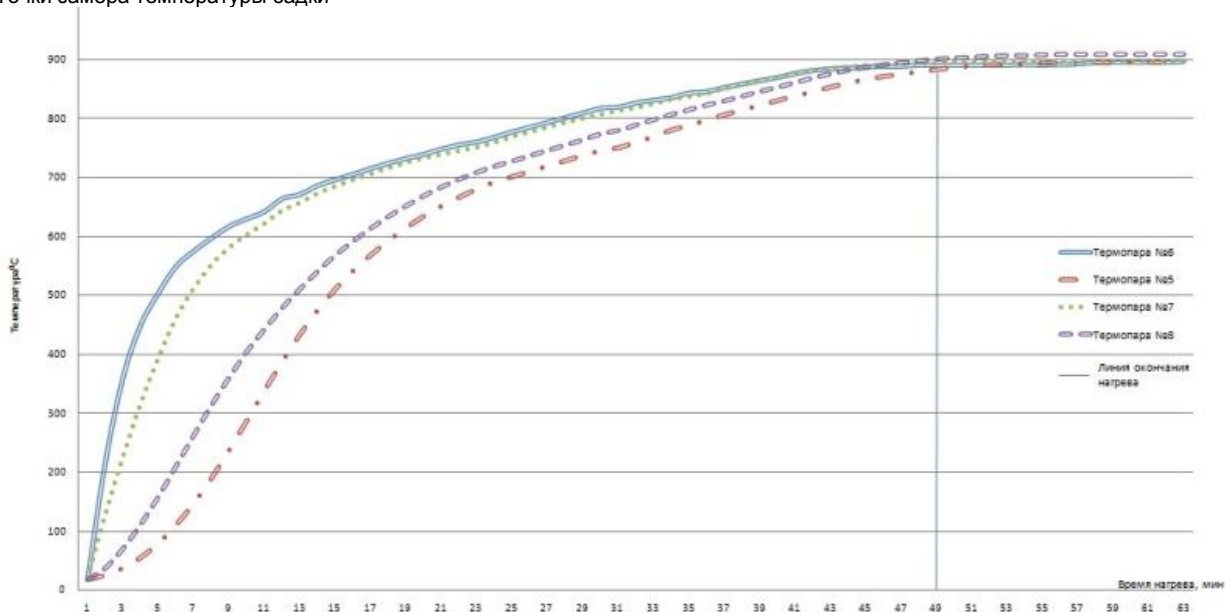


Рис. 4. Пример температурного поля садки (при нагреве колец Рашига $d_n = 22$ мм, при расходе воздуха $1,71 \cdot 10^{-4}$ кг/с)

Была проведена серия экспериментов по нагреву насыпных садок без фильтрации и с фильтрацией газа.

Садки формировались изделиями из стали 45 различных конфигураций: кольцами Рашига наружным диаметром 22 мм с толщиной стенки 2 мм; кольцами Рашига с наружным диаметром 32 мм с толщиной стенки 2 мм; а также цилиндрами диаметром 16 мм и длиной 16 мм.

В соответствии с ГОСТ 7342-79, качество термической обработки определяется микроструктурой, твердостью, глубиной поверхностного слоя и т.д. По диаграмме углерод–железо качественный нагрев для стали 45 при закалке происходит в диапазоне температур от 840 до 860 °С. В соответствии с параметрами качества термической обработки металла, нагрев заготовок происходил до температуры 900 °С. Конечный температурный перепад между поверхностью и центром садки составил 10 °С.

На рис. 4 представлено экспериментальное температурное поле садки из колец Рашига.

Тепловой баланс рабочего пространства печи запишем в следующем виде:

$$Q_{эл} = Q_{нагр} + Q_{возд} + Q_{прочие} + Q_{невязки},$$

где $Q_{эл}$ – количество теплоты, вносимое в печь от электронагревателей, МДж; $Q_{нагр}$ – количество теплоты, затраченное на нагрев металла, МДж; $Q_{возд}$ – количество теплоты, уносимое с подаваемым в печь воздухом, МДж; $Q_{прочие}$ – прочие потери теплоты, МДж; $Q_{невязки}$ – невязка, МДж;

$$Q_{эл} = IU\tau,$$

где I – сила тока, А; U – напряжение в сети, В; τ – время, затраченное на нагрев, с;

$$Q_{\text{нагр}} = m_{\text{садки}} c_{\text{садки}} (t_{\text{садки}} - t_{\text{окр.ср}}),$$

где $m_{\text{садки}}$ – масса садки, кг; $c_{\text{садки}}$ – удельная средняя теплоемкость садки, МДж/кг·град; $t_{\text{садки}}$ – среднемассовая конечная температура нагрева садки, град; $t_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды, град;

$$Q_{\text{возд}} = m_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t_{\text{возд}} - t_{\text{окр.ср}}),$$

где $m_{\text{возд}}$ – массовый расход воздуха, кг/с; $c_{\text{возд}}$ – удельная средняя теплоемкость воздуха, МДж/кг·град; $t_{\text{возд}}$ – конечная температура уходящего воздуха, град; $t_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды, град.

Результаты расчета теплового баланса рабочего пространства термической печи при нагреве различных насыпных садок сведены в табл. 1.

Режимные параметры нагрева садки приведены в табл. 2 (рис. 5). Для оценки эффективности нагрева использованы удельные затраты энергии на нагрев одного кг садки (отношение затрат электрической энергии к массе нагреваемого металла), кВт·ч/кг:

$$W = \frac{\mathcal{E}}{m}.$$

Таблица 1. Результаты расчета теплового баланса печи

Номер опыта	Вид изделия	Приходные статьи		Расходные статьи		
		$Q_{\text{эл}}$, МДж	$Q_{\text{нагр}}$, МДж	$Q_{\text{возд}}$, МДж	$Q_{\text{прочие}}$, МДж	$Q_{\text{невязки}}$, МДж
1	Кольца Рашига $D_{\text{нар}} = 32$ мм	4,17	3,59	0	0,582	$145 \cdot 10^{-6}$
2		4,26	3,59	$514 \cdot 10^{-6}$	0,671	$143 \cdot 10^{-6}$
3		4,19	3,59	$217 \cdot 10^{-5}$	0,599	$143 \cdot 10^{-6}$
4		4,39	3,59	$4,03 \cdot 10^{-5}$	0,793	$143 \cdot 10^{-6}$
5	Кольца Рашига $D_{\text{нар}} = 22$ мм	4,22	3,64	0	0,793	$143 \cdot 10^{-6}$
6		4,28	3,64	$530 \cdot 10^{-6}$	0,585	$147 \cdot 10^{-6}$
7		4,33	3,64	$214 \cdot 10^{-5}$	0,647	$147 \cdot 10^{-6}$
8		4,41	3,64	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,77	$147 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2. Режимные параметры нагрева садки

№	Режим нагрева	Средняя скорость нагрева, град/мин	Удельные затраты энергии на нагрев одного кг садки, кВт·ч/кг	Время достижения параметров качества, мин
Масса садки $m_1 = 4,129$ кг				
1	Нагрев колец Рашига $d = 21$ мм при отсутствии дутья	14,0	0,281	66
2	Нагрев колец Рашига $d = 21$ мм при фильтрации воздуха через садку с расходом $1,71 \cdot 10^{-4}$ кг/с	24,9	0,278	49
3	Нагрев колец Рашига $d = 21$ мм при фильтрации воздуха через садку с расходом $5,72 \cdot 10^{-4}$ кг/с	23,2	0,282	59
4	Нагрев колец Рашига $d = 21$ мм при фильтрации воздуха через садку с расходом $8,57 \cdot 10^{-4}$ кг/с	11,3	0,295	77

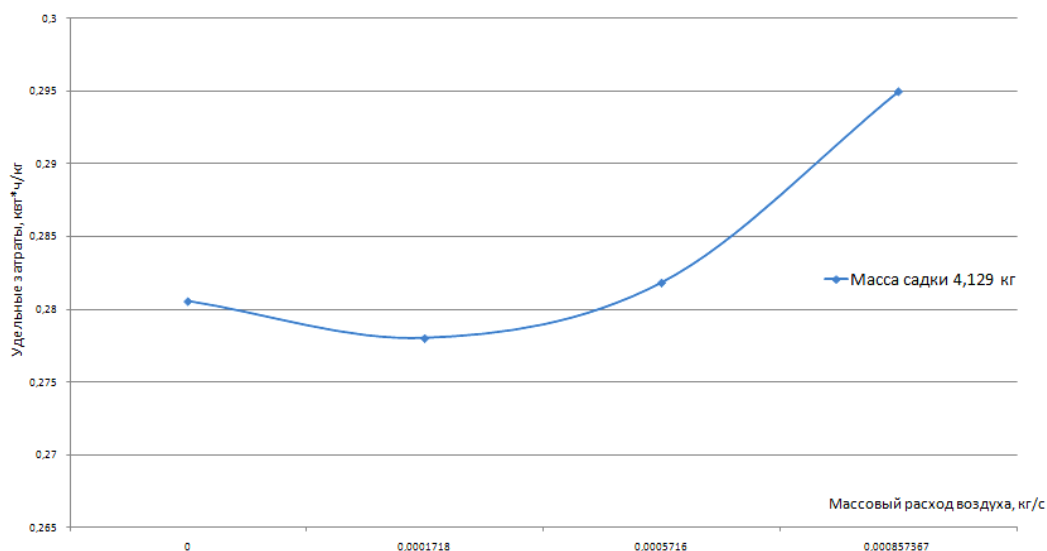


Рис. 5. Зависимость удельных затрат от массового расхода воздуха

Заключение

Таким образом, интенсификация нагрева насыпных садок возможна за счет организации фильтрации газа через садку.

Эффективность нагрева может быть достигнута за счет правильного выбора скорости фильтрации газа.

Список литературы

1. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. – Иваново, 1973. – 364 с.
2. Бровкин Л.А., Гусев В.А. О краевых условиях в процессах сушки фильтрацией теплоносителя // Известия вузов. Энергетика. – 1983. – № 5. – С. 79–82.
3. Становой В.И., Буйлов А.А., Пуговкин А.У. Определение эффективных теплофизических свойств насыпных садок // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 10. – С. 105–108.
4. Пуговкин А.У., Буйлов А.А., Становой В.И. Об интенсификации нагрева насыпных садок в термических печах // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990, № 2. – С. 83.
5. Крылова Л.С., Горбунов В.А. Решение сопряженной задачи теплообмена в нагревательных печах кузнечного производства // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. – № 12. – С. 18–20.
6. Крылова Л.С., Глазов В.С. Энергосбережение при термообработке насыпных садок в термических печах

машиностроительных заводов // Проблемы энергосбережения. – 1995. – № 2, 3. – С. 65–67.

References

1. Brovkin, L.A. *Temperaturnye polya tel pri nagreve i plavlenii v promyshlennykh pechakh* [Temperature fields of bodies under heating and melting in industrial furnaces]. Ivanovo, 1973. 364 p.
2. Brovkin, L.A., Gusev, V.A. O kraevykh usloviyakh v protsessakh sushki fil'tratsiey teplonositelya [On boundary conditions of drying by coolant filtration]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1983, no. 5, pp. 79–82.
3. Stanovoy, V.I., Buylov, A.A., Pugovkin, A.U. Opre-delenie effektivnykh teplofizicheskikh svoystv nasypnykh sadok [Determination of effective thermophysical properties of bulked batches]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1987, no. 10, pp. 105–108.
4. Pugovkin, A.U., Buylov, A.A., Stanovoy, V.I. Ob intensifikatsii nagreva nasypnykh sadok v termicheskikh pechakh [On intensification of bulked batch heating in thermal furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1990, no. 2, p. 83.
5. Krylova, L.S., Gorbunov, V.A. Reshenie sopryazhennoy zadachi teploobmena v nagrevatel'nykh pechakh kuznechnogo proizvodstva [Solution to the conjugate problem of heat exchange in forging batch-heating furnaces]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1994, no. 12, pp. 18–20.
6. Krylova, L.S., Glazov, V.S. Energoberezhenie pri termoobrabotke nasypnykh sadok v termicheskikh pechakh mashinostroitel'nykh zavodov [Energy-saving in thermal treatment of bulked batches in thermal furnaces of machinery plants]. *Problemy energoberezheniya*, 1995, no. 2, 3, pp. 65–67.

Перевезенцев Григорий Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
e-mail: mkandy@mail.ru

Колибаба Ольга Борисовна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетике теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: koli-baba@mail.ru

Горбунов Владимир Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетике теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Потехин Антон Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант 1-го курса,
e-mail: potehin1994_94@mail.ru