

Л. П. Грес /д. т. н./, Ю. К. Литовченко /к. т. н./,  
 А. Е. Быстров, Ю. М. Флейшман /к. т. н./,  
 Л. А. Воробьева /к. т. н./, М. Ю. Иванов  
 Национальная металлургическая академия  
 Украины

## Определение коэффициентов теплоотдачи насадок доменных воздухонагревателей с горизонтальными проходами

Создана установка для исследования газодинамических и тепловых характеристик насадки с горизонтальными проходами. На ее основе определены коэффициенты конвективного теплообмена и получены критериальные соотношения  $Nu_i = f(Re_i)$  для шероховатого сплошного канала, вертикальных каналов с двумя и тремя горизонтальными проходами, насадочного блока с горизонтальными проходами. (Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 1 назв.).

**Ключевые слова:** коэффициент теплоотдачи, насадки, доменные воздухонагреватели, теплообмен.

*It has been built the facility for the study of gas dynamic and thermal characteristics of checkers with horizontal channels. It was obtained criterial-relations hold  $Nu_i = f(Re_i)$  for the rough continuous channel vertical channels with two or three horizontal channels, for checkers with horizontal channels of which are defined relevant convective heat transfer coefficients.*

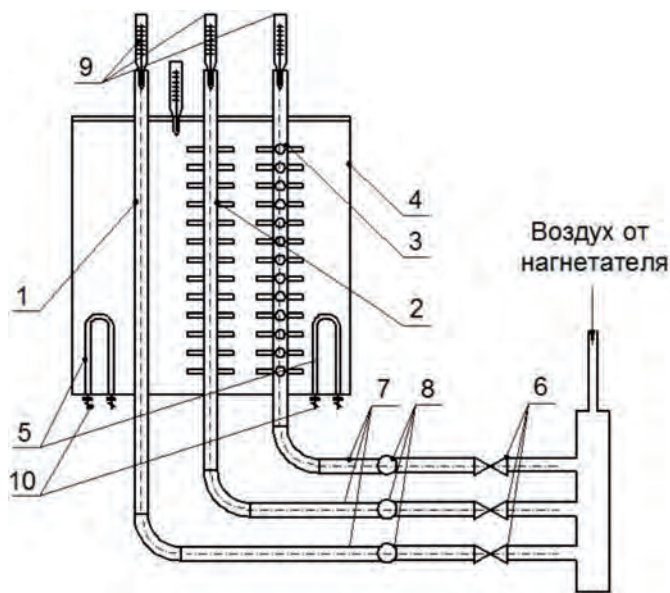
**Key words:** heat-transfer coefficient, filings, hot-blast stoves, heat exchange.

Блочные насадочные изделия с горизонтальными проходами имеют следующие преимущества перед изготовленными по ГОСТ 20901-75 и не имеющими горизонтальных проходов:

- увеличенный срок службы благодаря наличию горизонтальных каналов на верхней и нижней поверхностях блоков и возможности перетока газов из соседних каналов в случае засорения вертикального канала на некоторой высоте;
- более высокий коэффициент теплоотдачи благодаря наличию зон повышенной турбулентности (вихреобразования) в районе пересечения вертикальных каналов с горизонтальными.

Коэффициент теплоотдачи насадочного блока с вертикальными каналами и горизонтальными проходами определяли на установке (рис. 1). Экспериментально исследовано три типа насадок: с гладким каналом 1, двумя 2 и тремя 3 горизонтальными проходами. Моделирующие каналы расположены в баке 4, обогреваемом П-образными электронагревателями 5 мощностью по 5 кВт. Воздух по каналам 7 направляется в исследуемые элементы 1, 2, 3. Расход воздуха на каждый элемент измеряется с помощью расходомеров 8. Температура подогрева воздуха в каналах измеряется спиртовыми термометрами 9.

Вода в баке 4 нагревается до кипения, и ее температура поддерживается с помощью авто-



1, 2, 3 – соответственно модели каналов насадки: гладкого, с двумя и тремя горизонтальными проходами; 4 – бак; 5 – электронагреватели; 6 – регулировочные клапаны; 7 – измерительные воздухопитающие трубы; 8 – расходомеры воздуха; 9 – термометры для измерения температуры воздуха на выходе из моделей каналов; 10 – электровыключатели

**Рис. 1. Схема установки для определения газодинамических и тепловых характеристик насадки с горизонтальными проходами**

трансформатора. Вода в баке 4 поддерживает равной температуре кипения 100 °С, а расход газа по параллельным каналам 1, 2, 3 – одинаковым. В ламинарной области при равных расходах газа показания термометров 4 одинаковы. В турбулентной области имеет место минимальная температура в гладкой трубе 1, максимальная – в трубе 3 с тремя горизонтальными отводами. Эксперимент проводится до наступления стационарного теплового состояния, которое определяется стабилизацией показаний термометров 4.

В табл. 1 и рис. 2–4 приведены результаты обработки опытных данных в виде безразмерных зависимостей  $Nu = f(Re)$  для одиночной гладкой трубы, труб с двумя и тремя горизонтальными проходами и насадочного блока.

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией для насадочного блока с горизонтальными проходами (рис. 4) определяли по выражению:

$$\alpha_{кбл.п} = \frac{\alpha_1 \cdot n_1 + \alpha_2 \cdot n_2 + \alpha_3 \cdot n_3}{n_1 + n_2 + n_3}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  брались для одинаковых чисел  $Re_i$ , причем  $\alpha_1, n_1$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и число гладких каналов,  $\alpha_2, n_2$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и число каналов с двумя проходами,  $\alpha_3, n_3$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и число каналов с тремя проходами. При этом  $n_1 = n_3 = 1, n_2 = 10$ .

**Выводы**

Создана установка для исследования газодинамических и тепловых характеристик насад-

Таблица 1

**Зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи конвекцией**

Наименование каналов	Коэффициенты теплоотдачи конвекцией
Насадка из шестигранных блоков с круглыми отверстиями [1]	$\alpha_k = 0,0218 \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{0,8}$ при $Re > 4260$ ; $\alpha_k = 2,95 \cdot 10^{-4} \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{1,31}$ при $1700 \leq Re < 4260$ ; $\alpha_k = 1,83 \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{0,14}$ при $Re < 1700$ .
Шероховатый сплошной стальной канал	$\alpha_k = 0,008255 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,875}$ ; $Nu = 0,0147 \cdot Re^{0,82}$ при $Re > 3500$ ; $\alpha_k = 4,467 \cdot 10^{-12} \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{3,5}$ ; $Nu = 2,26 \cdot 10^{-13} \cdot Re^{3,87}$ при $2500 \leq Re < 3500$ ; $\alpha_k = 0,708 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,233}$ ; $Nu = 1,185 \cdot Re^{0,1615}$ при $Re < 2500$ .
Вертикальный канал с 2 горизонтальными проходами и шагом между последними 60 мм	$\alpha_k = 0,0012217 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,866}$ ; $Nu = 0,405 \cdot Re^{0,323}$ при $Re > 3200$ ; $\alpha_k = 1,936 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{1,933}$ ; $Nu = 2,03 \cdot 10^{-8} \cdot Re^{2,521}$ при $2000 \leq Re < 3200$ ; $\alpha_k = 0,776 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,233}$ ; $Nu = 0,405 \cdot Re^{0,323}$ при $Re < 2000$ .
Вертикальный канал с 3 горизонтальными проходами и шагом между ними 60 мм	$\alpha_k = 0,00933 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,9}$ ; $Nu = 0,00809 \cdot Re^{0,923}$ при $Re > 3200$ ; $\alpha_k = 1,936 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{1,933}$ ; $Nu = 2,03 \cdot 10^{-8} \cdot Re^{2,521}$ при $2000 \leq Re < 3200$ ; $\alpha_k = 0,776 \cdot (\lambda/d) \cdot Re^{0,233}$ ; $Nu = 0,405 \cdot Re^{0,323}$ при $Re < 2000$ .
Насадка с горизонтальными проходами	$\alpha_k = 1,412 \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{0,184}$ при $Re < 1820$ ; $\alpha_k = 1,089 \cdot 10^{-7} \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{1,31}$ при $1820 \leq Re < 3020$ ; $\alpha_k = 0,068 \cdot (\lambda/d_3) \cdot Re^{0,675}$ при $Re \geq 3020$ .

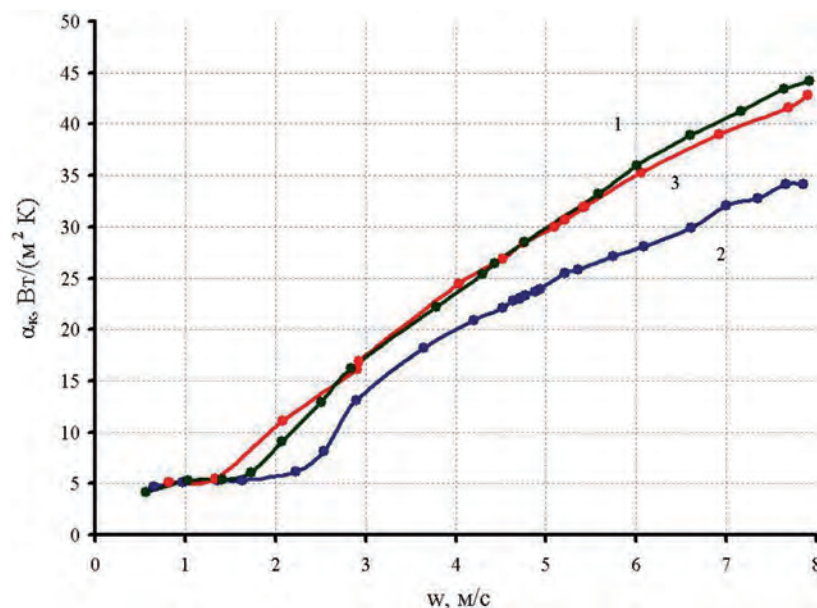


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплоотдачи конвекцией для каналов с тремя 1, двумя горизонтальными проходами 3, сплошного канала 2 от скорости воздуха

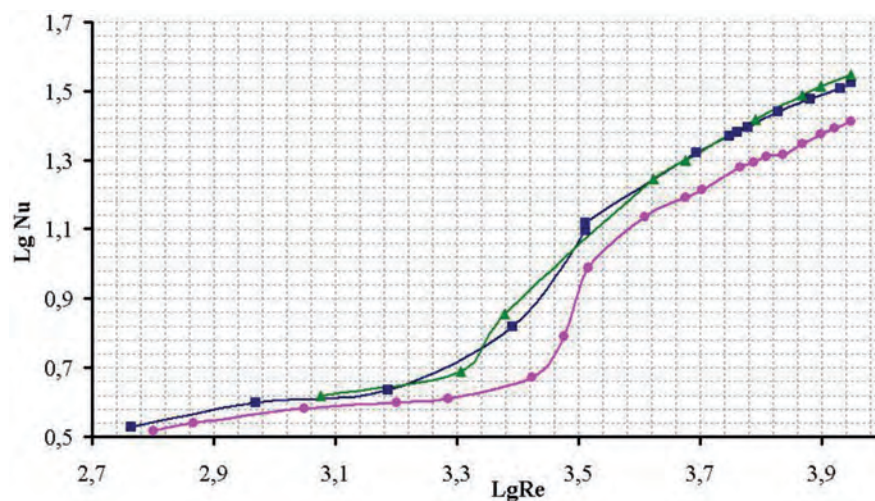


Рис. 3. Зависимость критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса в логарифмических координатах для каналов с тремя 1, двумя 2 проходами и сплошного канала 3

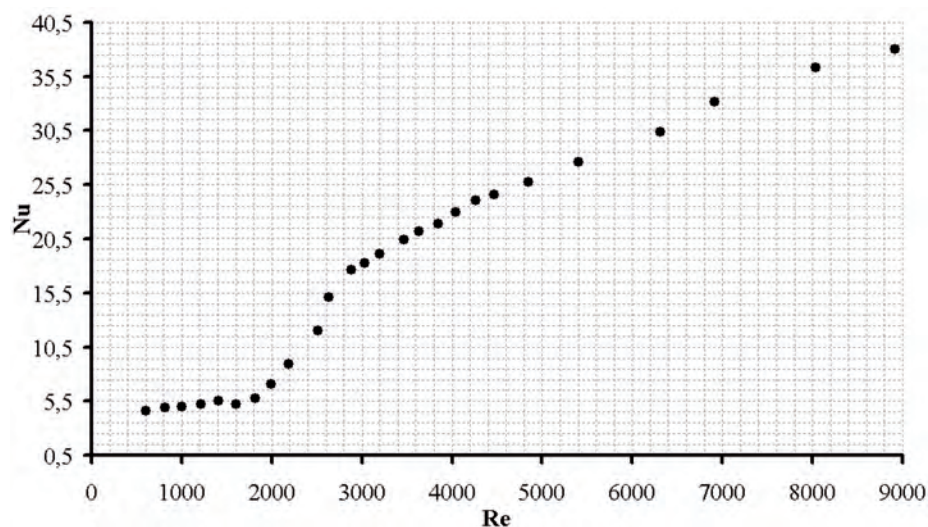


Рис. 4. Зависимость критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса для насадочного блока с горизонтальными проходами

ки с горизонтальными проходами. На ее основе для ламинарной, переходной и турбулентной областей течения получены зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса для сплошного канала и каналов с тремя и двумя проходами. На основании полученных экспериментальных зависимостей сделана оценка величины коэффициентов теплоотдачи и критериев  $Nu$  для регенеративной насадки воздушнонагре-

вателя с горизонтальными проходами, которая может быть использована в проектных расчетах.

#### Библиографический список

1. Шкляр Ф. Р. Доменные воздушнонагреватели / Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, С. П. Каштанова [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.

Поступила 15.01.2016.



УДК 621.1.016

Наука

В. П. Иващенко /д. т. н./, Г. Г. Швачич /д. т. н./,  
А. В. Соболенко /к. т. н./

Национальная металлургическая академия  
Украины

## Максимально параллельные вычислительные алгоритмы в решениях задач тепло- и массообмена

*Рассмотрены проблемы математического моделирования задач Дирихле на основе использования параллельных вычислительных систем кластерного типа. Особое внимание уделяется построению максимальных параллельных форм алгоритмов разностных схем, имеющих трехдиагональную структуру. Выявлены особенности распараллеливания при помощи метода перестановок. (Библиогр.: 8 назв.).*

**Ключевые слова:** уравнение теплопроводности; методы параллельных вычислений; алгоритмы распараллеливания.

*The problems of mathematical design of the Dirichlet's problems are considered on the basis of the use of the parallel computer systems of cluster type. The special attention is spared to the construction of maximal parallel forms of algorithms of difference charts having a three-diagonal structure. The features of parallelization are deduced through the method of transpositions.*

**Key words:** thermal conductivity equation; methods of parallel computing; parallelization algorithms.

### Постановка проблемы и анализ последних достижений в данной области

Актуальность проблемы разработки численных методов для решения многомерных систем параболических квазилинейных уравнений, описывающих процессы тепло- и массообмена, можно считать не вызывающей сомнений. Одним из наиболее интересных примеров таких систем могут служить уравнения гидродинамики и металлургической теплофизики [1; 2]. К настоящему времени сложилась такая ситуация, когда решение одномерных нестационарных задач может осуществляться с точностью, достаточной для большинства технических запросов. О массовом решении трехмерных нестационарных задач теплопроводности на нынешнем уровне технической возможности и на базе

традиционных методов, разработанных к настоящему времени, по-видимому, можно говорить, только учитывая следующие обстоятельства.

Во-первых, появление современных и недорогих средств коммуникации вычислительной техники стимулировало развитие новых информационных технологий (ИТ), к которым относятся системы параллельной обработки информации. Организация параллельной обработки информационных потоков, связь проблем распараллеливания с архитектурой ПЭВМ, системы параллельного программирования, методы и алгоритмы параллельных вычислений – вот ключевые фазы развития вычислительной техники на данном этапе [3–5].

Во-вторых, к настоящему времени наметились определенные тенденции развития вы-