

## Литература

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А. А. Русанова. – М., 1983. – 312 с.
2. Массоотдача при свободном стекании пленки жидкости по наружным и внутренним поверхностям, груб / Н. М. Коновалов [и др.] // Теорет. основы хим. технологии, 1993. – С. 309–314.
3. Амелин, А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара / А. Г. Амелин. – М., 1972. – 303 с.
4. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М., 1955. – 352 с.
5. Очистка промышленных газов от пыли / В. П. Ужов [и др.]. – М. : Химия, 1981. – 392 с.
6. Ужов, В. Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М. : Химия, 1972. – 410 с.
7. Сугак, Е. В. Расчет эффективности прямооточных сепараторов. Научно-технический и социальный прогресс лесопромышленного комплекса Восточно-Сибирского региона : сб. ст. / Е. В. Сугак. – Красноярск, 1990. – Т. 1. – С. 110–115
8. Низкоэнергетическая система очистки дымовых газов / С. Л. Ровин [и др.] // Литье и металлургия. – 2002. – № 2. – С. 118–120.

УДК 621

**ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ И ГАЗОМ****К. Джапбыев, Г. Атаев, С. Батыров, А. Иллиев***Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

*Определено, что при меняющейся температуре набегающего потока прилегающего к частице, слой обладает некоторой тепловой инерцией. В связи с этим изменение поля температур в пристенной области, определяющего теплопритоки к шару, может протекать медленнее, чем меняется разность температур газа к частиц. Отсюда и возможность отличий значений коэффициентов теплоотдачи в стационарном и нестационарном случаях.*

**Ключевые слова:** межфазный теплообмен, коэффициент теплоотдачи, число Нусельта.

**HEAT EXCHANGE BETWEEN SOLID PARTICLES AND GAS****K. Dzhapbyev, G. Ataev, S. Batyrov, A. Illiev***State Energy Institute of Turkmenistan, Mary*

*The physical meaning of the conclusion made is as follows: with a changing temperature of the free-stream flow adjacent to the particle, the layer has some thermal inertia. In this regard, changes in the temperature field in the near-wall region, which determines the heat flow to the ball, can occur more slowly than the change in the temperature difference between the gas and the particles. Hence the possibility of differences in the values of heat transfer coefficients in stationary and non-stationary cases.*

**Keywords:** interfacial heat transfer, heat transfer coefficient, Nusselt number.

Для изучения межфазного теплообмена в плотном слое металлических шаров при монотонном изменении температуры газа рассмотрим модель межфазного теплообмена частиц и газа. Введем цилиндрическую систему координат  $(z, r, \varphi)$ , жестко связанную с частицей, ось направлена в сторону течения газа. Обозначим температуру газа  $T$ , температуру частиц  $t$ ,  $u_f$  – скорость газа,  $\lambda_f$ ,  $a_f$ ,  $\lambda_h$ ,  $a_h$  – коэффициенты теплопроводности, соответственно, газа и частиц. Пусть средняя температура газа в сечении [1, 2]:

$$T_g(\tau) = \frac{\iint ru_f T(0, r, \varphi, \tau) dr d\varphi}{\iint ru_f dr d\varphi}.$$

Меняется по времени линейно:

$$T_g(\tau) = T_{go} + A\tau. \quad (1)$$

Такое определение закона изменения  $T_g(\tau)$  имеет физический смысл. Пусть есть некоторый закон изменения температуры газа по длине теплообменника  $T_g(l)$ .

Обозначим скорость движения частиц  $u_h$ . Тогда для выделенной частицы получим:

$$T_g = T_g(u_h \tau),$$

где  $T_g$  – функция времени, которая с достаточной точностью может быть заменена своей кусочно-линейной аппроксимацией  $T$ , и  $t$  удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} = a_f \Delta T - (\vec{u}_f, \nabla T), \\ \frac{dt}{d\tau} = a_h \Delta t, \end{cases} \quad (2)$$

условиям по бесконечности:

$$T_{go} + A\tau - T \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty,$$

граничным условиям на поверхности частицы [3]:

$$T = t,$$

$$\lambda_f \frac{dT}{dN} = \lambda_h \frac{dt}{dN}, \quad (3)$$

где  $\vec{N}$  – вектор внешней нормали к поверхности и начальным условиям:

$$\begin{cases} T(z, r, \varphi, 0) = T_0(z, r, \varphi), \\ t(z, r, \varphi, 0) = t_0(z, r, \varphi). \end{cases} \quad (4)$$

Представим  $T$  и  $t$  в виде:

$$T = A\tau + \theta(z, r, \varphi) + T_1(z, r, \varphi, \tau) + T_2(z, r, \varphi, \tau),$$

$$t = A\tau + \vartheta(z, r, \varphi) + t_1(z, r, \varphi, \tau) + t_2(z, r, \varphi, \tau), \quad (5)$$

где

$$\begin{cases} A + (\vec{u}_f, \nabla \theta) = \Delta \theta a_f, \\ A = a_h \Delta \vartheta, \end{cases} \quad (6)$$

$\theta$  и  $\vartheta$  удовлетворяют граничным условиям (3),  $T_1$  и  $t_1$  удовлетворяют системе (2), условиям (3) и начальным условиям:

$$T_1(z, r, \varphi, 0) = -\theta(z, r, \varphi), \quad (7)$$

$$t_1(z, r, \varphi, 0) = -\vartheta(z, r, \varphi).$$

Тогда  $T_2$  и  $t_2$  удовлетворяют системе (2), граничным условиям (3) и начальным (4). Кроме того, для функций  $\theta$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\vartheta$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  выполняются однородные условия на бесконечности.

Введем следующие понятия коэффициента теплоотдачи [4, 5]:

$$\alpha = \frac{\lambda_f \int \frac{\partial T}{\partial N} \partial S}{ST_g - tdS}, \quad (8)$$

здесь интегрирование ведется по поверхности частицы.

Введем безразмерные переменные:

$$\bar{Z} = \frac{z}{d}, \quad \bar{r} = \frac{r}{d}, \quad \bar{N} = \frac{N}{d}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau U_{cp}}{d}, \quad \bar{V} = \frac{\bar{U}}{U_{cp}},$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta U_{cp}}{Ad}, \quad \bar{\vartheta} = \frac{\vartheta U_{cp}}{Ad}, \quad \bar{T}_1 = \frac{T_1 U_{cp}}{Ad}, \quad \bar{T}_2 = \frac{T_2}{T_{go} - T_{ho}}, \quad \bar{t}_1 = \frac{t_1 U_{cp}}{Ad}, \quad \bar{t}_2 = \frac{t_2}{T_{go} - T_{ho}},$$

где  $U_{cp}$  – средняя скорость газа в расчете на свободное сечение теплообменника, из (8):

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_f} = \frac{Ad}{U_{cp}(T_{go} - T_{ho})} \frac{\int \frac{\partial(\theta + T_1)}{\partial N} ds + \int \frac{\partial T_2}{\partial N} ds}{-\frac{Ad}{U_{cp}(T_{go} - T_{ho})} \int (\vartheta + Z_1) ds - \int t_2 ds}. \quad (9)$$

Величины всех четырех поверхностных интегралов, входящих в (9), как отмечалось выше, от  $A$  не зависят. Отсюда напрашивается следующий вывод. Обозначим безразмерный критерий нестационарности:

$$k = \frac{\frac{dT_g}{d\tau} d}{U_{cp}(T_{go} - T_{ho})}.$$

При  $A = \frac{dT_g}{d\tau} = 0$  ( $k = 0$ ), что соответствует стационарному случаю в выражении (9) для  $Nu$ , присутствуют только члены, определяемые  $T_2$ ,  $t_2$ . С ростом  $k$  начинает проявляться и влияние других членов разложения (10):

$$T = A\tau + \theta(z, r, \varphi) + T_1(z, r, \varphi, \tau) + T_2(z, r, \varphi, \tau),$$

$$t = A\tau + \vartheta(z, r, \varphi) + t_1(z, r, \varphi, \tau) + t_2(z, r, \varphi, \tau). \quad (10)$$

Наконец, при больших  $k$  влияние членов, определяемых  $T_2$ , и  $t_2$ , становится незначительным, и величина  $Nu$  зависит только от слагаемых в числителе и знаменателе (9), содержащих в качестве множителя критерия  $k$ .

При этом получаем:

$$Nu = \frac{\int \frac{\partial}{\partial N} (\bar{\theta} + \bar{T}_1) dS}{\int (\bar{\theta} + \bar{t}_1) dS},$$

т. е. с ростом  $k$  зависимость числа  $Nu$  от  $k$  уменьшается и в пределе  $Nu$  становится независимым от  $k$ .

Таким образом, значения чисел  $Nu$  при стационарном и нестационарном режимах определяются различными членами выражения для поля температур, следовательно, и сами значения чисел  $Nu$  в стационарном и нестационарном режимах могут существенно отличаться между собой. Этот вывод имеет принципиальное значение, и его следует иметь в виду при анализе результатов экспериментального исследования межфазного теплообмена в плотном слое.

#### Литература

1. Джапбыев, К. Математическая модель процесса теплообмена при противотоке / К. Джапбыев, А. Чарыев, В. Мальковский // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХиГН. – 1986. – № 2. – С. 60–62.
2. Джапбыев, К. З. Исследования нестационарного теплообмена в плотном слое шаров, омываемых газом / К. Джапбыев, З. Л. Миропольский, В. И. Мальковский // Теплоэнергетика. – 1986. – № 3. – С. 70–72.
3. Джапбыев, К. Теплообмен в шаровой насадке, омываемой газом : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. Джапбыев. – А., 1987. – 19 с.
4. Регенеративный теплообменник работающих с твердым теплоносителем для охлаждения дымовых газов / К. Джапбыев [и др.] // МЦНП «НОВАЯ НАУКА», Рос. Федерация, г. Петрозаводск, 2023.
5. Куприянов, В. Н. Экспериментальное исследование гидродинамики потоков в ректификационной колонне с псевдооживленной шаровой насадкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Куприянов. – М., 1969. – 18 с.

УДК 004.942:519.876.5

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА АДАПТЕРА В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ

**Д. В. Джасов**

*Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш»,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

**В. Б. Попов**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Представлен подход к моделированию сложных мехатронных систем на примере механизма поворота адаптера в поперечном направлении. Для этого используется платформа для мультифизического моделирования Simcenter Amesim компании Siemens PLM Software. Благодаря этому создана и исследована модель, которая позволила оптимизировать параметры компонентов системы механизма поворота адаптера, применяющихся на зерноуборочных комбайнах с системой автоматического копирования рельефа поля.*

**Ключевые слова:** моделирование, механизм, гидросистема, управление.