

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 532.546

С.В. Звягин  
(S.V. Zvyagin)  
УГЛТУ, Екатеринбург  
(USFEU, Ekaterinburg)

### МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В РАЗРЕЖЕННОЙ ЗОНЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ (MODEL OF HEAT TRANSFER IN A DILUTE PHASE OF THE FLUIDIZED BED)

*Исследован процесс переноса тепла из разреженной в плотную фазы кипящего слоя путем подачи в разреженную фазу (зону всплесков над слоем) струй горячего воздуха. Частицы кипящего слоя, подбрасываемые пузырями, нагревались конвекцией в зоне подачи струй горячего воздуха и затем, падая, отдавали тепло частицам в ядре слоя.*

*Heat transfer from the dilute phase into the bulk of the fluidized bed was investigated by means of the heated air-jet injection into the dilute phase (the zone where particles circulate above the bulk of the bed). Fluidized particles thrown up by bursting bubbles above the bed level are convectively heated in the air-jet region and release accumulated heat after their falling back onto the bed.*

При сжигании древесных отходов (щепы, коры и т.д.) часто используют топки с кипящим слоем. Для организации полноты сжигания древесного топлива важным является перенос тепла из разреженной зоны (надслоевого пространства) в ядро кипящего слоя при подаче над слоем струй горячего воздуха. Частицы кипящего слоя, подбрасываемые пузырями, нагреваются конвекцией в зоне подачи струй горячего воздуха и затем при падении отдают тепло частицам в ядре слоя.

Автором представлена математическая модель охлаждения потока горячего газа в надслоевом пространстве кипящего слоя. Теплообмен газового потока описывается при следующих предположениях:

- 1) площадь поперечного сечения потока над кипящим слоем  $S$  постоянна вдоль направления его движения;
- 2) молекулярная теплопроводность газов в потоке пренебрежимо мала по сравнению с молярной;

3) температура входящих в поток частиц равна температуре слоя, температура возвращающихся в слой частиц равна температуре газового потока  $T(x)$ ;

4) перенос частиц в направлении движения потока ( $x$ ) пренебрежимо мал;

5) температура потока изменяется только вдоль направления его движения:  $T = T(x)$ ;

6) теплофизические параметры вещества потока (теплоемкость, плотность) постоянны;

7) теплообмен рассматривается в стационарных условиях.

Рассмотрим тепловой баланс элементарного потока газа  $dV$ , движущегося над кипящим слоем. Тепло  $dQ$ , которое отдается участком потока длиной  $dx$ , идет на нагрев частиц и воздуха, поступающих в поток из слоя, до избыточной температуры  $v(x)$ .

Для описания температурного поля в потоке используем уравнение теплопроводности:

$$Q = -\lambda \text{grad}v + \rho_2 c_2 \omega_2 v.$$

Молекулярной теплопроводностью пренебрегаем, следовательно

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 c_2 \omega_2 v).$$

Уравнение теплового баланса:

$$\frac{\partial}{\partial x}[\rho_2 \omega_2(x) c_2 v(x)] + mc v(x) \frac{1}{H_{mn}} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_2 \omega_2 c_2$  – плотность, скорость и теплоемкость газа;

$m, c$  – массовый расход, теплоемкость частиц;

$H_{mn}$  – высота надслоевого пространства.

Материальный баланс вещества в потоке с учетом подвода псевдоожижающего агента описывается уравнением непрерывности вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho_2 \omega_2(x) = \frac{m_0}{H_{mn}}. \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности (1), используя уравнение непрерывности (2), записывается в виде

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{m_2 c_2 + mc}{\rho_2 c_2 \omega_2 H_{mn}} v(x) = 0, \quad (3)$$

откуда

$$\omega_2(x) = \int \frac{m_2}{\rho_2 H_{mn}} dx + \text{const}.$$

Зная начальные условия  $\omega_z(0) = \omega_0$ , запишем

$$\omega_z(x) = \omega_0 + \frac{m_z}{\rho_z H_{mn}} x = \omega_0 + \frac{\omega_z}{H_{mn}} x.$$

Полученное выражение подставляем в уравнение (3):

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{m_z c_z + mc}{\rho_z c_z H_{mn} \left( \omega_0 + \frac{\omega_z}{H_{mn}} x \right)} v = 0.$$

Обозначим  $A = m_z c_z + mc$ ;  $B = \rho_z c_z \omega_0 H_{mn}$ ;  $D = \rho_z c_z \omega_z$ , тогда

$$v' + \frac{A}{B + Dx} v = 0. \quad (4)$$

Решение (4) выглядит следующим образом:

$$v(x) = C_1 (B + Dx)^{-\frac{A}{D}}. \quad (5)$$

Зная граничные условия  $v(x) \big|_{x=0} = v_0$ , находим  $C_1 = v_0 B^{\frac{A}{D}}$ , откуда

$$v(x) = v_0 \left( 1 + \frac{D}{B} x \right)^{-\frac{A}{D}},$$

$$v(x) = v_0 \left( 1 + \frac{\omega_z}{\omega_0 H_{mn}} x \right)^{-\left( 1 - \frac{mc}{m_z c_z} \right)}. \quad (6)$$

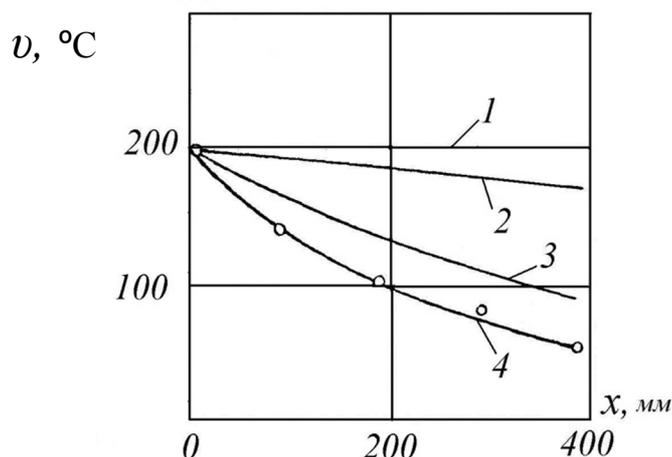
Анализ полученного решения (6) показывает следующее:

1) при отсутствии псевдоожижения и охлаждения потока частицами ( $m_z = 0$ ;  $m = 0$ ) его температура по всему надслоевому пространству постоянна (идеальный случай движения потока без теплообмена с окружающей средой);

2) при отсутствии ожигания воздухом, в условиях виброкипящего слоя ( $m = 0$ ) выражение (6) трансформируется в экспоненциальное изменение температуры потока в надслоевом пространстве виброкипящего слоя.

Графический анализ уравнения (6), а также сравнение с экспериментальными данными, полученными на модели газового потока над слоем, показаны на рисунке.

При отсутствии псевдоожижения и выбросов частиц из слоя зависимость  $v(x)$  представляет прямую 1 (движение потока без теплообмена). Если слой находится на пределе ожигания и всплески отсутствуют, наблюдается подмешивание агента к газовому потоку, поэтому температура потока  $v(x)$  линейно убывает по длине надслоевого пространства (прямая 2).



Зависимость относительной температуры по длине надслоевого пространства

При отсутствии псевдоожигения и наличии всплесков (виброкипящий слой) температура потока падает по экспоненте (кривая 3). При интенсивном псевдоожигении температура надслоевого пространства находится из выражения (6) – кривая 4. Точками даны экспериментальные значения  $v(x)$ , полученные на модельной установке. Из рисунка видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с кривой, построенной по уравнению (6).

УДК 66.021:536.24

Ю.В. Путилин, О.Б. Пушкарева  
(Yu.V. Putilin, O.B. Pushkareva)  
УГЛТУ, Екатеринбург  
(USFEU, Ekaterinburg)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ (IMPROVEMENT OF THE HEAT PUMPS BASIC EQUIPMENT)

*В статье описана целесообразность применения в качестве испарителей и конденсаторов пароконденсационных тепловых насосов горизонтально-трубных пленочных аппаратов.*

*Preference of using of the horizontal-tubes film apparatus as the evaporators and condensers of steam-compressor heat pumps is described.*

В настоящее время в мире интенсивно развиваются энергосберегающие технологии, основанные на применении в системах теплоснабжения и в производственных процессах (в том числе для сушки лесоматериалов) тепловых