

ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ И ТЕПЛОМАССОБМЕН ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В СРЕДЕ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ

П. В. Акулич

Лаборатория сушильно-термических и биотепловых процессов, Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

В настоящее время одним из развивающихся направлений повышения эффективности теплообменных процессов является создание нестационарных, дискретно-импульсных режимов ввода энергии в дисперсные системы, волновых и резонансных режимов течения несущей фазы с конечной амплитудой колебаний скорости и давления. Это обусловлено тем, что нестационарные режимы движения фаз приводят к интенсификации ряда тепловых и массообменных технологических процессов (горения, растворения, сушки, экстракции и т. п.) [1–3]. Для создания таких режимов течения применяются различные устройства: разнообразные клапаны, акустические излучатели, камеры пульсационного горения и др. Особо следует отметить развитие нестационарных волновых режимов течения несущей фазы (газа, жидкости) с конечной амплитудой колебаний скорости и давления (резонансных течений). Такие режимы создаются, например, в камерах пульсационного горения [4, 5]. В последние годы возобновился интерес исследователей и производителей оборудования к использованию в процессах сушки и теплотехнологиях перегретого пара. Это вызвано, с одной стороны, увеличением интенсивности процессов теплообмена при температурах перегретого пара выше 200°C по сравнению с использованием нагретого воздуха, а с другой – возможностью утилизации теплоты отходящих газов путем конденсации водяных паров. В связи с этим научный и практический интерес представляет изучение влияния колебаний сжимаемого перегретого пара с конечной амплитудой скорости (расхода) на динамику твердых частиц и межфазный теплообмен.

В настоящей работе методом численного моделирования исследуется волновое движение дисперсной фазы в условиях колебаний сжимаемого влажного воздуха и перегретого водяного пара с конечной амплитудой и их влияние на межфазный теплообмен. Рассматривается движение двухфазной дисперсной смеси частиц с несущей фазой, которая в первом случае состоит из двух компонентов – сухого воздуха и водяного пара, а во втором представляет собой только перегретый водяной пар. Система уравнений движения формулируется на основе уравнений газовой динамики взаимопроникающих континуумов сжимаемых сред [1, 5].

Дифференциальные уравнения сохранения масс фаз, импульсов и энергии имеют следующий вид:

сохранения масс фаз

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial x} = n j_{21}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial x} = n j_{12}; \quad (2)$$

сохранения числа дисперсных частиц

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(n v_2)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

сохранения массы сухого воздуха, когда несущей фазой служит нагретый влажный воздух

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_3 v_1)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Приведенные плотности фаз ρ_1 и ρ_2 , характеризующие массы фаз в единице объема смеси, равны:

$$\rho_1 = \varepsilon_1 \rho_1^0, \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1, \quad \varepsilon_2 = \pi d^3 n / 6, \quad \rho_2^0 = \rho_2 / \varepsilon_2, \quad j_{21} = -j_{12}; \quad \rho_3^0 = \rho_3 / \varepsilon_1, \quad \rho_4^0 = \rho_1^0 - \rho_3^0.$$

Уравнения импульсов фаз

$$\frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 v_1^2)}{\partial x} = -\varepsilon_2' \frac{\partial P}{\partial x} - \varepsilon_2' n f_{12} - \frac{3}{2} \varepsilon_2 n j_{12} v_{12} - n j_{12} v_2, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 v_2^2)}{\partial x} = -\frac{3}{2} \varepsilon_2 \frac{\partial P}{\partial x} + \varepsilon_2' n f_{12} + \frac{3}{2} \varepsilon_2 n j_{12} v_{12} + n j_{12} v_2 - \rho_2 g_2, \quad (6)$$

где $\varepsilon_2' = 1 - \frac{3}{2} \varepsilon_2$, $v_{12} = v_1 - v_2$.

Уравнение полной энергии смеси

$$\frac{\partial(\rho_1 E_1 + \rho_2 E_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\rho_1 v_1 E_1 + \rho_2 v_2 E_2 + P(\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2)] = \rho_2 g_2 v_2. \quad (7)$$

Уравнение притока теплоты к дисперсной фазе

$$\frac{\partial(\rho_2 e_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 e_2 v_2)}{\partial x} = n q_2. \quad (8)$$

Уравнение состояния, полная и внутренняя энергия фаз

$$P = \rho_1^0 R^* T_1 / M_1, \quad E_i = e_i + \frac{v_i^2}{2}, \quad e_1 = c_1 T_1, \quad e_2 = c_2 T_2. \quad (9)$$

В исследуемых процессах амплитуда смещения среды обычно значительно больше диаметра частиц, поэтому обтекание частиц можно полагать квазистационарным. Коэффициент массообмена определялся по формуле $Sh = 2 + 0.55 Re_{12}^{0.5} Sc^{0.33}$, а для перегретого пара использовалась также формула Э. Н. Тыныбекова $Sh = 2 + 0.35 Re_{12}^{0.8} (T_s / T)^{0.4}$, где $Re_{12} = d |v_1 - v_2| / \nu_1$, $\nu_1 = \mu_1 / \rho_1$.

Интенсивность массообмена от твердой фазы к газовой, приходящаяся на одну дисперсную частицу:

$$j_{21} = \pi d D Sh (\rho_{4s}^0 - \rho_4^0), \quad \rho_{4s}^0 = P_s M_4 / R^* T_s. \quad (10)$$

Предполагается условие равновесия фаз на межфазной границе $T_{2R} = T_s(P)$. При этом обычно можно пренебречь тепловым сопротивлением внутри частиц, полагая $T_2 = T_{2R}$.

Уравнение притока теплоты на межфазной границе

$$q_2 = j_{12}r + q_1, \quad (11)$$

$$q_1 = -\pi d \lambda_1 \text{Nu} (T_{2R} - T_1). \quad (12)$$

Коэффициент теплообмена определялся по зависимостям, аналогичным для массообмена.

Зависимость для силы межфазного трения, действующей на частицу, имеет вид

$$f_{12} = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_1^0 |v_1 - v_2| (v_1 - v_2) f_{12}^0, \quad (13)$$

где $f_{12}^0 = f_{12}^1 \psi_\varepsilon \psi_M$, $f_{12}^1 = \frac{24}{\text{Re}_{12}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_{12}}} + 0.4$,

с учетом поправок на стесненность обтекания $\psi_\varepsilon = (1 - \varepsilon_2)^{-2.7}$ и сжимаемость несущей фазы

$$\psi_M = 1 + \exp\left(-\frac{0.427}{\text{M}_{12}^{4.63}} - \frac{3}{\text{Re}_{12}^{0.88}}\right). \text{ Здесь число Маха } \mathbf{M}_{12} = \left(\frac{M_1}{\gamma R^* T_1}\right)^{0.5} |v_1 - v_2|.$$

Граничные условия: при $X = 0$ $\rho_1^0 = P_1 M_1 / (R^* T_1)$; $\rho_3^0 = \rho_1^0 / (U_{10} + 1)$; $T_1 = 473$ К; $\varepsilon_2 = 0.0005$; $T_2 = 293$ К; $n = 6\varepsilon_2 / \pi d^3$; $v_2 = v_2^*$; $\rho_2^0 = 900$ кг/м³.

На левой границе скорость несущей фазы задавалась периодической функцией времени по зависимости $\bar{v}_1 + v_1^a \sin(2\pi\omega t)$. Здесь же вводится дисперсная фаза.

Условия на правой границе области, на выходе из канала, задавались двумя способами: проводилась экстраполяция течения за выделенную область расчета; безразмерный расход газа принимался равным единице, т. е. канал полагался акустически закрытым. При этом размерный расход газа на выходе является постоянной величиной, равной среднему по времени расходу газа на входе в канал.

Расчеты выполнены при следующих значениях основных параметров в случае несущей фазы – влажного воздуха: $U_{10} = 0.025$; $c_5 = 4190$ Дж/(кг·К); $c_3 = 1000$ Дж/(кг·К); $c_4 = 1850$ Дж/(кг·К); $T_1 = 573$ К; $\rho_6 = 500$ кг/м³; $r = 2.26 \cdot 10^6$ Дж/кг; $M_1 = 29$ кг/кмоль; $M_4 = 18$ кг/кмоль; $R^* = 8314$ Дж/(кмоль·К); $\gamma_3 = 1.4$; перегретого пара при $T_1 = 573$ К: $c_4 = 2011$ Дж/(кг·К); $\lambda_4 = 0.0434$ Вт/(м·К); $\mu_4 = 20.29 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\text{Pr} = 0.94$, $\gamma_4 = 1.32$. Общие параметры для обоих случаев: $\bar{v}_1 = 30$ м/с; $v_1^{a'} = v_1^{a''} = 20$ м/с; $f = 100$ Гц; $\chi = 0.5$; $c_2 = 2000$ Дж/(кг·К); $\rho_{20} = 1100$ кг/м³; $U_{20} = 0.83$; $L = 6.3$ м; $d = 0.003$ м.

При создании на левой границе колебаний расхода несущей фазы (влажного воздуха, перегретого пара) происходит волновое движение несущей и твердой фаз. Так как скорость частиц на входе задавалась на порядок меньше средней скорости газа, то на разгонном участке скорость частиц значительно возрастает, далее их движение носит волнообразный характер. Скорости газовой и твердой фаз совершают периодические колебания с одинаковой частотой, но со сдвигом по фазе, причем амплитуда скорости газа больше, чем частиц. При наличии колебаний газа возможно существенное возрастание относительной

скорости фаз по сравнению со стационарным потоком. При использовании в качестве несущей фазы горячего воздуха и перегретого водяного пара движение фаз носит подобный характер с некоторым фазовым сдвигом (рис. 1). Важной отличительной особенностью движения фаз, когда безразмерный расход газа равен единице (акустически закрытый канал), является наличие резонансных режимов течения при изменении длины канала (расчетной области) [2].

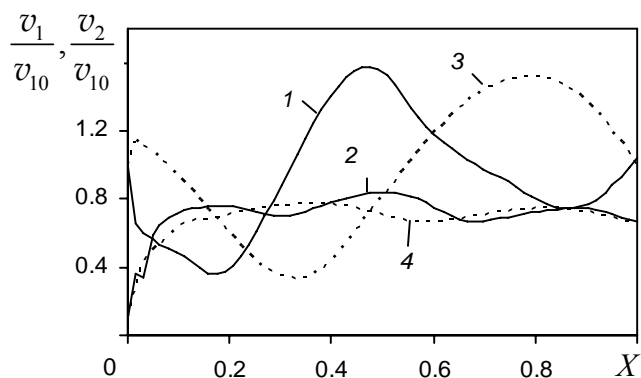


Рис. 1. Эпюры скорости несущей фазы (1, 3) и частиц (2, 4): 1, 2 – горячий воздух; 3, 4 – перегретый пар

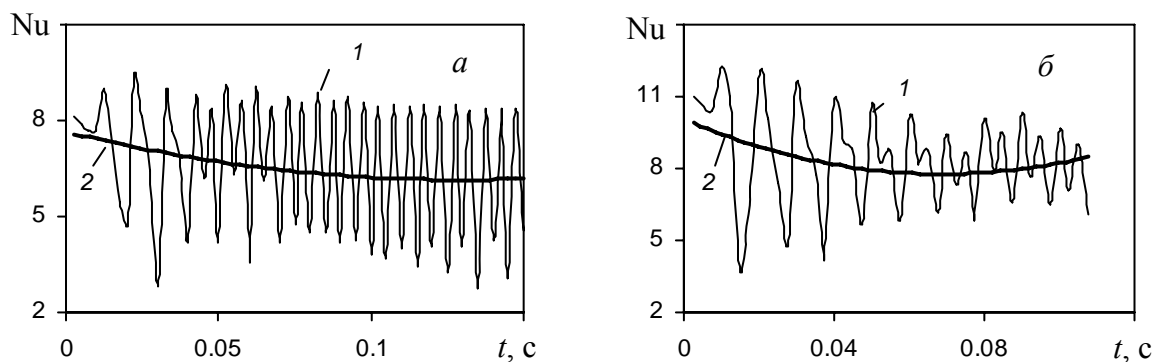


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от времени в точке $X=5$ м. Несущая фаза – нагретый воздух (а); перегретый пар (б). 1 – текущие значения; 2 – средние значения

Из зависимости числа Нуссельта от времени видно, что колебания несущей фазы приводят к волнообразному его изменению во времени (рис. 2). Причем значения Nu , а следовательно, интенсивность межфазного теплообмена в потоке перегретого водяного пара выше, чем в нагретом воздухе при прочих равных условиях. Это обусловлено увеличением движущей силы массообмена в среде перегретого пара. Следует отметить, что аналогичные расчеты выполненные при температуре несущей фазы $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, свидетельствуют о незначительном увеличении интенсивности тепломассообмена в перегретом паре.

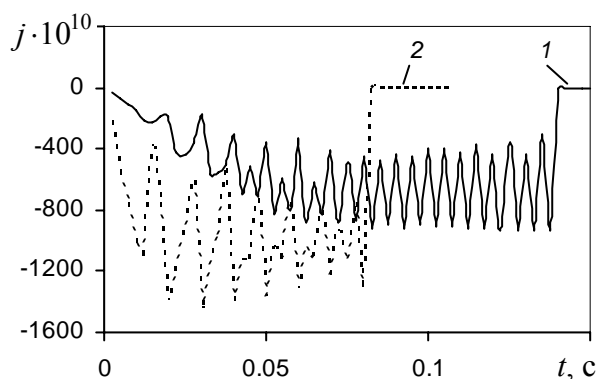
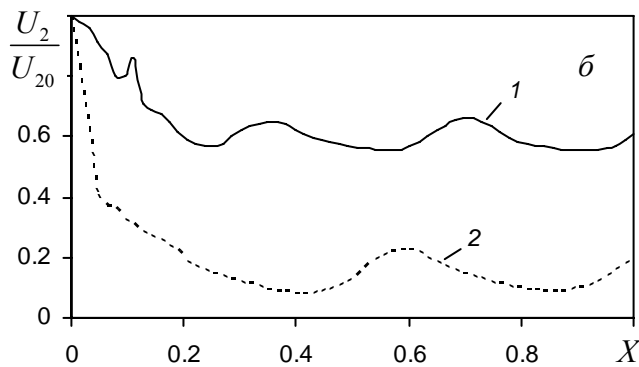
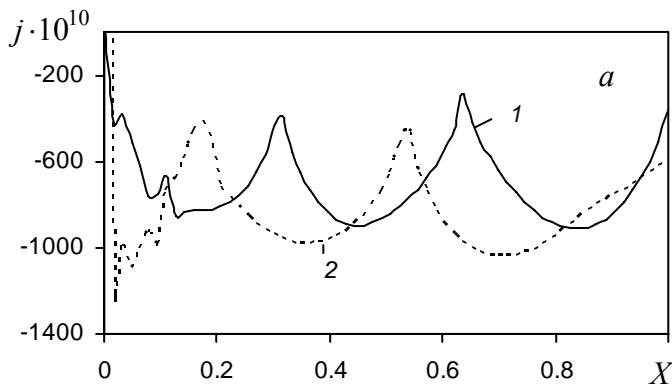


Рис. 3. Зависимость интенсивности испарения с единичной частицы от времени в точке $X=5$ м. 1 – горячий воздух; 2 – перегретый пар

Из рис. 3 видно, что в перегретом паре интенсивность испарения выше, чем в нагретом воздухе. В результате время сушки, соответствующее моменту прекращения испарения $j = 0$, в первом случае меньше, чем во втором.



Из зависимости интенсивности испарения влаги (воды) с единичной частицы от координаты X следует, что в пучностях волны интенсивность массоотдачи максимальна, а в узлах – минимальна. При использовании в качестве несущей фазы воздуха и перегретого пара характер зависимости подобен с некоторым смещением по фазе (рис. 4, а).

Влагосодержание частиц стабилизируется примерно на расстоянии $X = 0.2$ и далее изменяется незначительно. Причем в перегретом паре влагосодержание частиц значительно ниже (рис. 4, б).

Рис. 4. Эпюры влагосодержания (а) и интенсивности испарения с единичной частицы (б): 1 – горячий воздух; 2 – перегретый пар

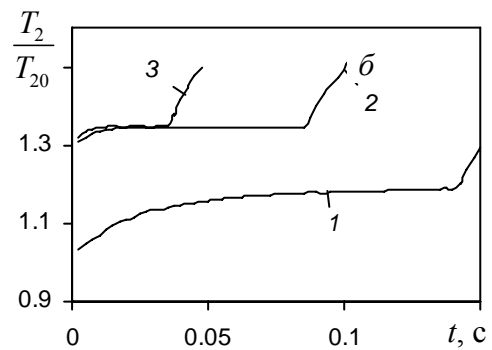
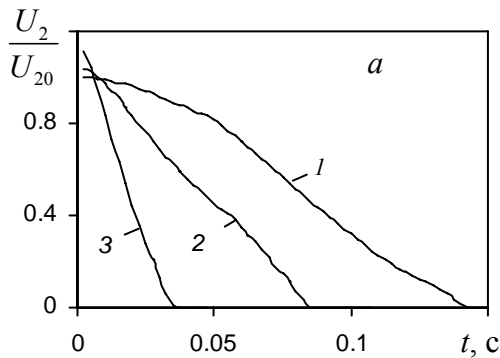


Рис. 5. Зависимость влагосодержания (а) и температуры (б) частиц от времени на выходе из канала. Несущая фаза – нагретый воздух (1); перегретый пар (2, 3)

Кинетические зависимости влагосодержания и температуры частиц от времени отчетливо иллюстрируют повышение скорости тепло- и массообменных процессов в среде перегретого пара. Как следовало ожидать, определение коэффициентов теплообмена по формуле Э. Н. Тыныбекова приводит к значительно большей интенсивности теплообмена (кривая 3 на рис. 5). В работе рассматривается удаление свободной влаги, т. е. первый период сушки. В потоке горячего воздуха температура частиц возрастает от начального значения до температуры адиабатического насыщения газа (мокрого термометра) и далее после испарения свободной влаги стремится к температуре газа. В перегретом

водяном паре температура частиц увеличивается до температуры насыщения пара при заданном давлении, которая значительно выше, чем в горячем воздухе.

Таким образом, создание колебаний несущей фазы с конечной амплитудой скорости и применение перегретого пара при определенных условиях приводят к интенсификации межфазного теплообмена.

Обозначения

c – теплоемкость, Дж/(кг·К); d – диаметр частиц, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; E – полная энергия, Дж/кг; e – внутренняя энергия, Дж/кг; j_{12} – интенсивность фазового превращения, кг/с; L – длина канала, м; M – молекулярная масса, кг/кмоль; n – число частиц в единице объема; P – давление, Па; q – поток теплоты, Вт; r – теплота фазового превращения, Дж/кг; R – радиус частицы, м; R^* – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); T – температура, К; U – влагосодержание, кг/кг; v – скорость, м/с; x – координата, м; X – безразмерная координата, $X = x/L$; γ – показатель адиабаты; ε – объемная концентрация частиц, м³ твердой фазы/м³ смеси; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; ρ_i – приведенная плотность фазы, определяющая массу фазы в единице объема смеси (твердая фаза+несущая фаза), кг/м³; ρ_i^0 – плотность фазы при $n = 1, 2$, плотность компонента фазы, определяющая массу компонента в единице объема несущей фазы, при $n \neq 1, 2$, кг/м³; t – время, с; ω – частота, Гц. Нижние индексы: 1 – несущая фаза; 2 – дисперсная фаза; 3 – сухой воздух; 4 – водяные пары; 5 – вода; 6 – сухая частица, 0 – начальное (постоянное) значение; S – насыщенное состояние; верхние: 0 – истинные значения; a – амплитуда.

Литература

- [1] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
- [2] Акулич П. В., Куц П. С., Ноготов Е. Ф. Нестационарные волновые течения газозвеси в условиях колебаний расхода газа и их влияние на теплообмен. ТОХТ. 2004. Т. 38, № 5. С. 483–489.
- [3] Акулич П. В., Куц П. С. Волновое движение твердых частиц в пульсирующем потоке газа. ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 40–45.
- [4] Kuts P. S., Akulich P. V., Grinchik N. N., Zbicinski I., Nogotov E. F. Modeling of gas dynamics in a pulse combustion chamber to predict initial drying process parameters. Chem. Eng. J. 2002. No. 86. Pp. 25–31.
- [5] Акулич П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. Минск: ИТМО НАНБ, 2002. 268 с.