

УДК 66.02.071.7

**СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДОЙ ПРИМЕСИ
В СОСТАВЕ КАПЛИ ПРИ НАЛИЧИИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ**

Т. Р. Аманбаев, А. Джумагалиева, Г. Тилеуов
ЮКГУ им. М. Ауезова, г. Шымкент

Во многих технологических процессах участвуют смеси газа с мелкими частицами и крупными каплями. В связи с этим исследование движения капли в газовой взвеси мелких частиц (запыленном газе) имеет важное практическое значение. Процессы тепло- и массообмена около капли подробно исследованы в [1,2]. В частности, в сферически-симметричном случае, когда имеется только радиальное движение, получена асимптотика для числа Нуссельта, свидетельствующая о малом влиянии фазовых превращений и возникающего радиального движения на теплообмен газа с каплей при небольших перегревах. Показано, что тепловые процессы в обеих фазах и фазовые превращения происходят практически в квазистационарном режиме. В [3,4] влияние захвата частиц каплей на ее движение и теплообмен подробно изучено при отсутствии фазовых переходов. Динамика и теплообмен капли в запыленном газе при наличии процессов пылеулавливания и фазовых превращений исследованы в [5].

В данной работе рассмотрен вопрос об изменении концентрации твердого компонента в составе капли (появляющегося из-за пылеулавливания) при наличии фазовых превращений. Изучение этого вопроса является важным и представляет практический интерес, поскольку в некоторых случаях чрезмерное осаждение частиц на жидкую фазу может привести к нарушению оптимального режима работы технологического оборудования, а иногда и его забиванию.

При упрощающих предположениях [5] уравнения массы, импульса и внутренней энергии капли, двигающейся в запыленном газе, можно записать в виде

$$\begin{aligned} dm_{2\ell}/dt &= -j^v, & dm_2/dt &= j^c - j^v, & dm_2 v_2/dt &= f + j^c v_1 - j^v v_2, \\ dm_2 e_2/dt &= -q_{2\ell} + j^c e_{1p} - j^v e_{\ell s}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь m_2, v_2, e_2 – масса, скорость и внутренняя энергия капли; $m_{2\ell}$ – масса ее жидкой составляющей; j^c, j^v – интенсивности пылеулавливания и фазовых превращений; $f, q_{2\ell}$ – сила вязкого трения между газом и каплей и интенсивность притока тепла к межфазной поверхности изнутри капли; v_1, e_{1p} – скорость и внутренняя энергия мелких частиц; $e_{\ell s}$ – внутренняя энергия жидкой составляющей капли при температуре насыщения.

Для замыкания системы (1) необходимо добавить уравнения состояния капли и мелких частиц. При этом жидкую составляющую капли и мелкие частицы будем считать несжимаемыми, а их теплоемкости – постоянными. Тогда уравнения состояния можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} e_{1p} &= c_p T_1, & e_2 &= c_2 T_2, & c_2 &= x_{2\ell} c_f + x_{2p} c_p, \\ \rho_p^\circ, \rho_f^\circ, c_p, c_f &= \text{const}, \\ x_{2\ell} &= m_{2\ell}/m_2, & x_{2p} &= m_{2p}/m_2, & m_2 &= m_{2\ell} + m_{2p}, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_1, T_2 – температуры эффективного газа и капли; c_p, c_2, c_t – теплоемкости мелких частиц, капли и ее жидкой составляющей; m_{2p} – масса твердого компонента капли, появляющегося за счет захвата мелких частиц.

Для определения интенсивности пылеулавливания используем элементарную схему подсчета столкновений между каплями и мелкими частицами с поправочным коэффициентом, учитывающим эффективность пылеулавливания [3]. Процессы фазовых превращений и теплообмена между каплями и газом будем описывать в рамках трехтемпературной схемы [1].

При решении системы (1)-(2) необходимо учитывать очевидную связь между диаметром капли, массой ее жидкой составляющей и полной (вместе с захваченными частицами) массой

$$\pi d^3 / 6 = m_{2t} / \rho_t^\circ + (m_2 - m_{2t}) / \rho_p^\circ.$$

Получить аналитическое решение системы (1)-(2) в общем случае затруднительно, поэтому были получены численные решения. Расчеты проводились для капли воды в водяном паре с мелкими частицами графита при давлении 0,1 МПа.

Необходимо отметить следующее обстоятельство. При наличии пылеулавливания чрезмерное осаждение мелких твердых частиц на каплю может привести к тому, что жидкой составляющей становится недостаточно для удержания частиц в составе капли. В частном случае, когда частицы сферические и за характерное время задачи они не успевают раствориться в жидком веществе капли, их объемная доля α_{2p} не может превышать предельного значения $\alpha_{2p}^* \cong 0,74$, соответствующего «наиболее плотной упаковке», так как частицы соприкасаются друг с другом, а их центры образуют тетраэдрическую решетку. Учитывая это обстоятельство, при проведении расчетов контролировалось условие, при котором объемная доля частиц в составе капли α_{2p} не превышала критического значения α_{2p}^* :

$$\alpha_{2p} = (m_2 - m_{2t}) / (m_2 - m_{2t} + \bar{\rho}_p^\circ m_{2t}) < \alpha_{2p}^* \cong 0,74, \quad \bar{\rho}_p^\circ = \rho_p^\circ / \rho_t^\circ.$$

Очевидно, что на изменение α_{2p} влияет не только собственно пылеулавливание, но и фазовые превращения, изменяющие массу жидкой составляющей капли. Причем конденсация пара уменьшает, а испарение капли, напротив, увеличивает объемную долю пылевых частиц в капле. Диаметр капли, соответствующий критическому объемному содержанию дисперсной фазы в ней, определяется по формуле:

$$\bar{d}^* = \left[(\bar{m}_2 - \bar{m}_{2t}) / (\alpha_{2p}^* \bar{\rho}_p^\circ) \right]^{1/3}, \quad \bar{m}_2 = m_2 / m_{20}, \quad \bar{m}_{2t} = m_{2t} / m_{20}.$$

В частности, при отсутствии фазовых превращений в случае $\rho_p^\circ = \rho_t^\circ$ критической объемной доле мелких частиц в капле $\alpha_{2p}^* \cong 0,74$ соответствует рост диаметра капли до значения $\bar{d}^* \cong 1,57$.

Характер изменения объемной доли мелких частиц в составе капли при её движении в запыленном газе показан на рисунке. Кривые построены для значений параметра $T_{20} / T_S = 0,8$ и коэффициента эффективности столкновений частиц с каплей $\eta = 0,8$. Время отнесено к характерному времени выравнивания скоростей газа и капли в стоксовом режиме $\bar{t} = t / \tau_{v0}^S$. Линии 1,2 соответствуют стоксовому режиму движения капли ($Re_0 \leq 1$) при относительном массовом содержании мелких частиц в газе $\bar{\rho}_{1p} = \rho_{1p} / \rho_g^0 = 10$ и разных перегревах пара $T_1 / T_S = 1,2$ и 2. Кривые 3-6 построены при числе Рейнольдса $Re_0 = 20$ и показывают влияние параметров T_1 / T_S и $\bar{\rho}_{1p}$ на поведение α_{2p} . Кривые 3,4 отвечают значению $T_1 / T_S = 1,2$ при разных $\bar{\rho}_{1p} = 1$ и 2, а линии 5,6 – другому значению $T_1 / T_S = 2$ с теми же $\bar{\rho}_{1p}$.

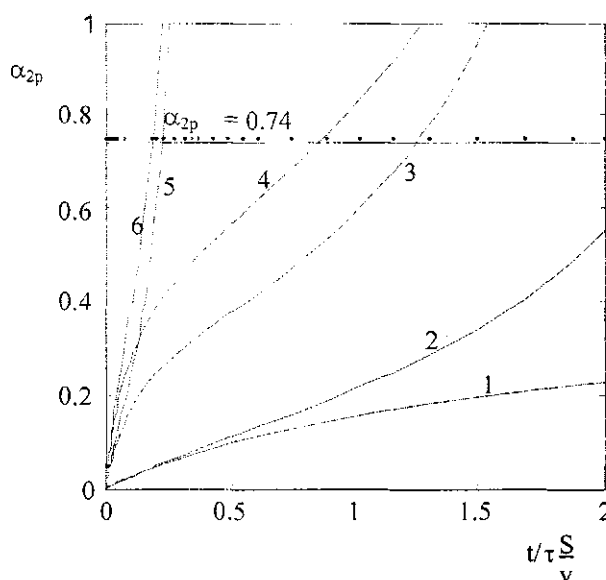


Рисунок - Зависимость объемного содержания твердой фазы в составе капли от времени

Видно, что в стоксовом режиме даже при достаточно большом массовом содержании мелких частиц в газе $\bar{\rho}_{1p}=10$ их объемная доля в составе капли α_{2p} растет медленно и в течение рассматриваемого промежутка времени $0 \leq \bar{t} \leq 2$ не успевает достичь своего критического значения $\alpha_{2p}^* \approx 0,74$ (кривые 1,2). При $Re_0=20$ величина α_{2p} довольно быстро достигает своего критического значения даже при небольших $\bar{\rho}_{1p}$. Например, в случае $T_1/T_s=1,2$ и $\bar{\rho}_{1p}=1$ объемная доля α_{2p} критического значения достигает уже к моменту $\bar{t}_* \approx 1,25$ (кривая 3). Причем с увеличением массового содержания дисперсной фазы в несущей среде время $\bar{t}_*$, при котором $\alpha_{2p} = \alpha_{2p}^*$, уменьшается. К понижению $\bar{t}_*$ приводит также и рост параметра перегрева пара T_1/T_s . Это связано, в основном, с тем, что при больших перегревах пара интенсивность испарения жидкой составляющей капли возрастает. К примеру, увеличение T_1/T_s от 1,2 до 2 при фиксированном $\bar{\rho}_{1p}=1$ (линии 3 и 5) приводит к сокращению $\bar{t}_*$ более чем в 5,5 раза.

Литература

- 1 Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т.1. -М.: Наука, 1987. -464 с.
- 2 Рахматулина И.Х. Нестационарный теплообмен при испарении, конденсированном росте и горении частиц или капель. Отчет № 1910.- М.: НИИ механики МГУ, 1977. -56 с.
- 3 Аманбаев Т.Р. Влияние пылеулавливания на движение капли в запыленном газе // ТОХТ. -1996.- Т. 30, № 5.- С. 458-463.
- 4 Аманбаев Т.Р. Динамика и теплообмен капли в запыленном газе // ТВТ. -1997.- Т. 35, № 1.- С. 80-85.
- 5 Аманбаев Т.Р. Динамика и теплообмен капли в запыленном газе при наличии фазовых превращений и пылеулавливания // ТВТ.- 2004. -Т. 42, № 5. -С. 697-704.

Қорытынды

Фазалық өзгерістер мен тозандану барысында тамшы құрамындағы тозанның концентрациясының өзгеруі зерттелген. Тамшының тозанданған газдағы қозғалыс және жылу алмасу теңдеулері сандық әдіспен шешілген.

Summary

Change of dust concentration in the drop by phase exchange and dust collection was investigated. The solutions of equations of drops motion and heat exchange were received by numerical method.