

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ НА ЧАСТИЦАХ ПЫЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ УЛАВЛИВАНИЯ В ПЕННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНО-БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТАХ

М.И. Шилиев*, Е.П. Грищенко**, А.А. Мельников**, Е.М. Хромова*

* - Томская государственная архитектурно-строительная академия, г. Томск

** - Красноярская государственная архитектурно-строительная академия, г. Красноярск

E-mail: shilyaev@mail.tomsknet.ru

Определены возможности и условия повышения эффективности улавливания частиц пыли в барботажных аппаратах за счет конденсации на них водяных паров

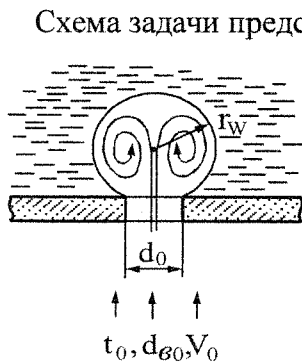


Схема задачи представлена на рис.1. Влажный пылегазовый поток со скоростью V_0 , температурой t_0 , влажностью $d_{в0}$, поступает в отверстие диаметром d_0 газораспределительной решетки пенного аппарата (ПА) и формирует на нем парогазовый пузырь, радиус которого изменяется во времени τ согласно зависимости [1]

$$r_w = \left(\frac{3}{16} d_0^2 V_0 \tau \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Рис.1. Схема паровоздушного пузыря, формирующегося на отверстии газораспределительной решетки ПА

Частицы пыли внутри пузыря, являясь при определенных условиях центрами конденсации водяного пара, приобретают за счет конденсата большие размеры, вследствие чего меняются силы инерции и сопротивления, действующие на них, и, соответственно, эффективность их выделения на внутреннюю поверхность пузыря. Эффект конденсации не обязательно проявляется положительно на процессе пылеулавливания. Он может оказаться либо малозначительным [2], либо, как будет показано в настоящей работе, даже отрицательным.

Расчет процесса пылеулавливания со сконденсировавшимся водяным паром на

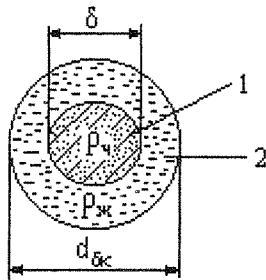


Рис.2. Схема частицы с конденсатом на поверхности:
1- частица, 2- конденсат

частицах внутри пузыря, формирующегося на газораспределительной решетке ПА, может быть проведен по той же схеме, что и для сухих частиц. Для этого может быть использовано уже полученное в [1] дифференциальное уравнение для концентрации частиц, в котором параметры частиц заменяются на эффективные параметры капли с частицей внутри размером $d_{жк}$ и плотностью $\rho_{жк}$ (см. рис.2). Это уравнение имеет вид

$$\frac{1}{n_{\delta k}} \frac{dn_{\delta k}}{dr_w} = - \frac{48}{d_0^2 V_0} \left[\frac{24 \tau_{\delta k} (\kappa V_0)^2}{A (d_{\delta k}/v_\Gamma)^{1-n}} \right]^{\frac{1}{2-n} - \frac{1-n}{\Gamma_w^{2-n}}}, \quad (2)$$

где $n_{\delta k}$ - концентрация частиц внутри пузыря в условиях конденсации водяных паров на них; κ - эмпирический коэффициент, для ПА $\kappa \approx 0,03-0,035$ [1]; v_Γ - кинематический коэффициент вязкости газа; A и n - постоянные в законе для коэффициента сопротивления частиц с конденсатом водяных паров на поверхности, которые далее будем называть просто каплями,

$$\xi_{\delta k} = \frac{A}{Re_{\delta k}^n}, \quad (3)$$

$Re_{\delta k}$ - число Рейнольдса обтекания капли:

$$Re_{\delta k} = \left| \vec{w}_{\delta k} \right| d_{\delta k} / v_\Gamma, \quad (4)$$

$\left| \vec{w}_{\delta k} \right|$ - модуль относительной (обтекания газом) скорости капли; $\tau_{\delta k}$ - время динамической релаксации капли:

$$\tau_{\delta k} = \frac{\rho_{\delta k} d_{\delta k}^2}{18 \mu_\Gamma}, \quad (5)$$

$\mu_\Gamma = \rho_\Gamma v_\Gamma$ - коэффициент динамической вязкости газа, ρ_Γ - плотность газа, $\rho_{\delta k}$ - эффективная (среднеобъемная) плотность капли:

$$\rho_{\delta k} = \rho_{ж} + \frac{\rho_{ч} - \rho_{ж}}{\Delta^3}, \quad (6)$$

$\rho_{ж}$, $\rho_{ч}$ - плотность жидкости (конденсата) и частицы соответственно, $\Delta = d_{\delta k} / \delta$ - относительный размер капли; $\bar{r}_w = r_w / r_{wk}$ - относительный размер пузыря, $r_{wk} = r_w (\tau = \tau_k)$, $\tau_k = 1/f$, f - частота отрыва пузыря от отверстия решетки. Соотношение (5) можно записать в виде

$$\tau_{\delta k} = \frac{\rho_{ч} \delta^2}{18 \mu_\Gamma} \frac{\rho_{\delta k}}{\rho_\Gamma} \left(\frac{d_{\delta k}}{\delta} \right)^2 = \tau_\delta \left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right) \Delta^2 \quad (7)$$

где использованы следующие соотношения для относительных плотностей:

$$\frac{\rho_{\delta k}}{\rho_{ч}} = \bar{\rho}_{\delta k} = \bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ч}}. \quad (8)$$

В зависимости (7) τ_δ - время динамической релаксации сухой частицы:

$$\tau_\delta = \frac{\rho_{ч} \delta^2}{18 \mu_\Gamma}. \quad (9)$$

Таким образом, условия сепарации частиц на внутреннюю поверхность пузыря при конденсации на них водяных паров существенно зависят от толщины пленки конденсата, связанной с относительным размером капли Δ , а также от относительной плотности конденсата $\bar{\rho}$. Определение величины Δ является предметом самостоятельной задачи о совместном тепломассообмене с конденсацией водяных паров на частицах пыли внутри

парогазового пузыря, формирующегося на газораспределительной решетке ПА. В общем виде эта задача сформулирована в [3]. В настоящей же работе проведем предварительный анализ влияния параметров $\bar{\rho}$ и Δ на эффективность пылеулавливания в ПА и ЦБА, используя дифференциальное уравнение (2) для ПА и соответствующее уравнение для ЦБА.

Рассмотрим сначала эффект конденсации в ПА. Разделим уравнение (2) на аналогичное, отвечающее условиям отсутствия конденсации водяных паров на частицах пыли внутри пузыря. В результате получим

$$\frac{\bar{n}_{\delta} \overline{dn_{\delta k}}}{\bar{n}_{\delta k} \overline{dn_{\delta}}} = \left[\frac{\tau_{\delta k} \left(\frac{\delta}{d_{\delta k}} \right)^{1-n}}{\tau_{\delta}} \right]^{\frac{1}{2-n}} = a_{\text{ПА}}. \quad (10)$$

Здесь

$$\bar{n}_{\delta} = \frac{n_{\delta}}{n_{\delta o}}, \quad \bar{n}_{\delta k} = \frac{n_{\delta k}}{n_{\delta o}} \quad (11)$$

- относительные концентрации частиц пыли размером δ , $n_{\delta o}$ - концентрация частиц размером δ на входе в отверстие газораспределительной решетки.

Решение уравнения (10) при условии

$$\bar{n}_{\delta k} (\bar{n}_{\delta} = 1) = 1 \quad (12)$$

приводится к зависимости

$$\left(\frac{\kappa_{\delta k}}{\kappa_{\delta}} \right)^{\text{ПА}} = \kappa_{\delta}^{a_{\text{ПА}} - 1}, \quad (13)$$

где $\kappa_{\delta k}$ и κ_{δ} - фракционные коэффициенты проскока частиц размером δ при наличии конденсации водяных паров на частицах и ее отсутствии соответственно и по своему определению равны:

$$\kappa_{\delta k} = \bar{n}_{\delta k}, \quad \kappa_{\delta} = \bar{n}_{\delta}. \quad (14)$$

Зависимость (13) представим в виде

$$\left(\frac{\kappa_{\delta k}}{\kappa_{\delta}} \right)^{\text{ПА}} = \kappa_{\delta}^{F^{\text{ПА}}(\Delta)}, \quad (15)$$

где

$$F^{\text{ПА}}(\Delta) = a_{\text{ПА}} - 1 = \left[\left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right) \Delta^{n+1} \right]^{\frac{1}{2-n}} - 1. \quad (16)$$

Для нестоксовского режима сопротивления частиц ($n=0,5$)

$$F^{\text{ПА}}(\Delta) = F_1^{\text{ПА}}(\Delta) = \left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right)^{2/3} \Delta - 1. \quad (17)$$

Для стоксовского режима сопротивления частиц ($n=1$)

$$F^{ПА}(\Delta) = F_0^{ПА}(\Delta) = \left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right) \Delta^2 - 1. \quad (18)$$

Аналогичным образом из дифференциального уравнения для концентрации частиц в цилиндрическом пузыре, формирующемся на тангенциальной щели шириной b завихрителя центробежно-барботажного аппарата (ЦБА) [1],

$$\frac{1}{n_\delta} \frac{dn_\delta}{dr_w} = -8\pi \left(\frac{24\kappa^2}{18A} \right)^{\frac{1}{2-n}} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_r} \frac{1}{Re} \right)^{\frac{1-n}{2(2-n)}} St\kappa_\delta^{\frac{n+1}{2(2-n)}} r_w^{n-2}, \quad (19)$$

где $Re = v_o \frac{2b}{\nu_2}$, $St\kappa_\delta = \tau_\delta \frac{v_o}{2b}$,

получим относительную величину фракционного коэффициента проскока

$$\left(\frac{K_{\delta K}}{K_\delta} \right)^{ЦБА} = K_\delta^{a_{ЦБА} - 1}. \quad (20)$$

Здесь величина $a_{ЦБА}$ определяется следующей зависимостью:

$$a_{ЦБА} = \left[\left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right) \Delta^2 \right]^{\frac{n+1}{2(2-n)}}. \quad (21)$$

Для $n=1$

$$F_0^{ЦБА}(\Delta) = (a_{ЦБА} - 1)_{n=1} = \left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right) \Delta^2 - 1, \quad (22)$$

что совпадает с зависимостью (18) для ПА.

Для $n=0,5$

$$F_1^{ЦБА}(\Delta) = (a_{ЦБА} - 1)_{n=0,5} = \left(\bar{\rho} + \frac{1 - \bar{\rho}}{\Delta^3} \right)^{0,5} \Delta - 1. \quad (23)$$

Из соотношений (15) и (20) следует, что поскольку $K_\delta < 1$, то положительное влияние конденсации на эффективность пылеулавливания будет в том случае, если $F(\Delta) > 0$, и тем значительнее, чем больше величина $F(\Delta)$. При отрицательных значениях $F(\Delta)$ конденсация приводит к снижению эффективности пылеулавливания. Это происходит при определенных соотношениях Δ и $\bar{\rho}$, когда эффективная плотность капли уменьшается, за счет чего снижается центробежная сила, действующая на нее, а сопротивление движению капли увеличивается.

Условие $F^{па}(\Delta) > 0$ для ПА приводит к соотношению

$$\bar{\rho} > \frac{\Delta^{2-n} - 1}{\Delta^3 - 1}. \quad (24)$$

Для $n=1$ это условие выполняется при

$$\Delta > \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 4 \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right)} - 1 \right). \quad (25)$$

Соответственно для $n=0,5$ должно быть

$$\Delta > \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right)^{2/3} \quad (26)$$

Для ЦБА условие $F^{\text{ЦБА}}(\Delta) > 0$ отвечает тому же соотношению (26), что и для ПА, но только для всех режимов сопротивления частиц, т.е. для любых значений n .

На рис.3 представлены результаты расчетов по выше полученным формулам функций $F(\Delta)$ для стоксовского и нестоксовского законов сопротивления движению капель в пузыре при различных соотношениях плотностей частиц и конденсата $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}$ для ПА и ЦБА. Здесь также приведены графики функций $F_1^{\text{ЦБА}}(\Delta)/F_1^{\text{ПА}}(\Delta)$, $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ПА}}$ и $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ЦБА}}$ для $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=2$. Последние две зависимости построены для $n=0,5$ и $\kappa_{\delta}=0,1$. Из приведенных результатов расчетов следует: положительный эффект конденсации водяных паров на частицах пыли снижается по мере роста плотности частиц и может быть отрицательным во всем диапазоне реально возможных значений Δ (см. зависимость $F_1^{\text{ПА}}(\Delta)$ для $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=4$); эффект конденсации проявляется более сильно в ЦБА, чем в ПА (см. кривую $F_1^{\text{ЦБА}}/F_1^{\text{ПА}}$, а также $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ПА}}$ и $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ЦБА}}$).

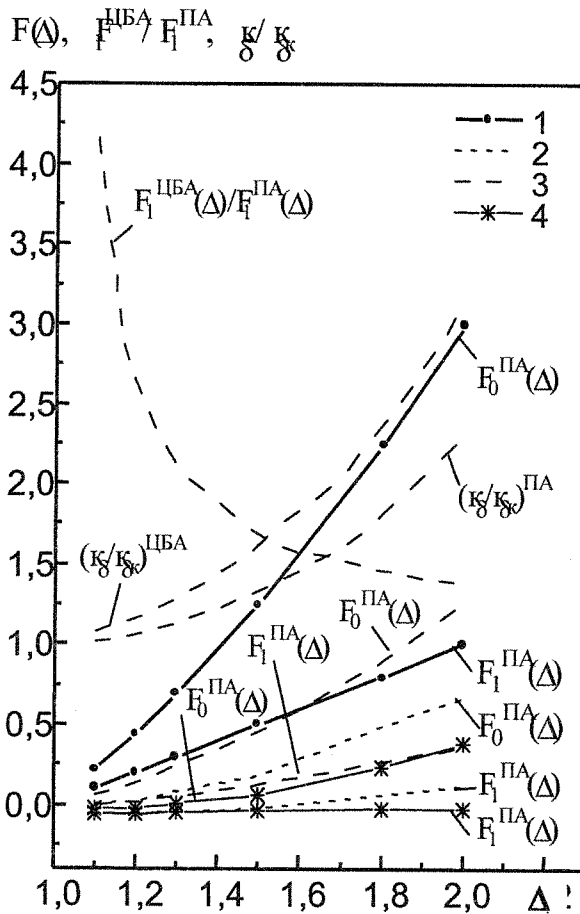


Рис.3. Расчет функций $F(\Delta)$, $F_1^{\text{ЦБА}}/F_1^{\text{ПА}}$, $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ЦБА}}$, $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{\text{ПА}}$:
 1 - $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=1$; 2 - $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=2$; 3 - $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=3$; 4 - $\rho_{\text{ч}}/\rho_{\text{жс}}=4$

В табл. 1 приведены результаты расчетов величины $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{ПА}$ при $\rho_c/\rho_{ж}=2$ и $\kappa_{\delta}=0,95$, из которой видно, что для наиболее мелких частиц

| Δ | $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{ПА}$ |
|----------|--|
| 1,1 | 1,003 |
| 1,2 | 1,007 |
| 1,3 | 1,012 |
| 1,5 | 1,024 |
| 1,8 | 1,047 |
| 2,0 | 1,066 |

положительный эффект конденсации на пылеулавливание проявляется слабо. Для $\kappa_{\delta}=0,95$ число $Stk_{\delta}=0,005$ [1]. Для частиц более крупных ($Stk_{\delta}=0,1$), как следует из рис.3, эффект конденсации весьма существенен и тем выше, чем больше Δ .

На рис. 4 приведена расчетная кривая $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{ПА}$ в зависимости от κ_{δ} при $\bar{\rho}=1, \Delta=1,2$, откуда следует, что для κ_{δ} близких к 1, что соответствует малым значениям чисел Стокса Stk_{δ} , т.е. мелким частицам, влияние конденсации на увеличение эффективности пылеулавливания проявляется слабо, но оно становится значимее с ростом толщины конденсата на частицах (кривая 3). На рис.4 кривой 4 представлена аппроксимация опытных данных фракционных коэффициентов проскока сухих частиц для ПА в зависимости от чисел Stk_{δ} , приведенная в [4].

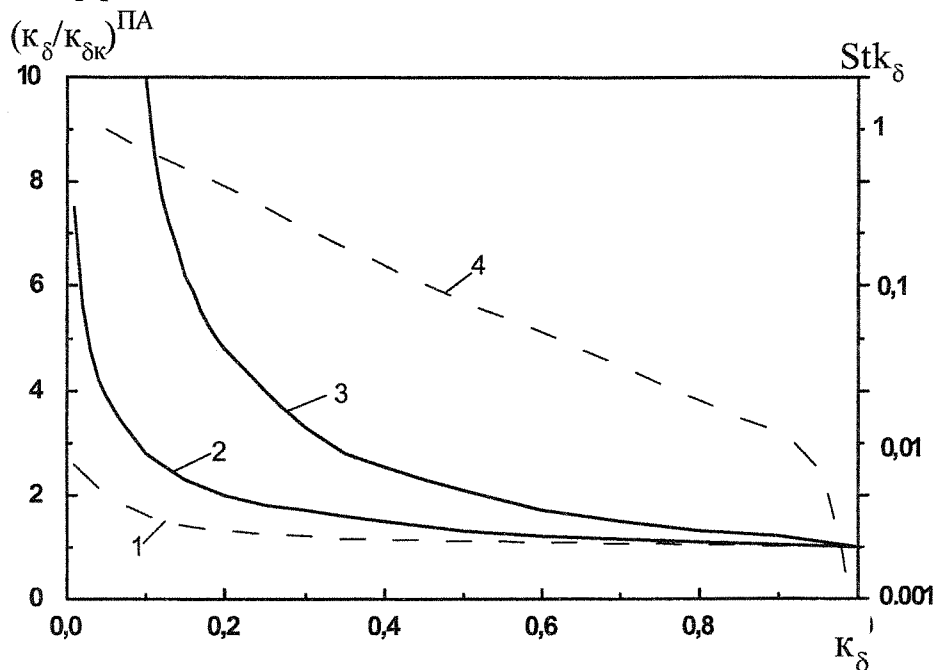


Рис. 4. Расчет зависимости $(\kappa_{\delta}/\kappa_{\delta\kappa})^{ПА}$ от κ_{δ} :

1- $n=0,5, \bar{\rho}=1, \Delta=1,2$; 2- $n=1, \bar{\rho}=1, \Delta=1,2$; 3- $n=0,5, \bar{\rho}=1, \Delta=2,0$; 4 - эмпирическая

$$\text{зависимость } K_{\delta} = \left(\frac{0,14}{0,14 + StK_{\delta}} \right)^{1,4} - 0,00113 \quad [4]$$

Выводы

В работе проведен анализ влияния конденсации водяных паров на частицах пыли на эффективность их улавливания в ПА и ЦБА. Показано, что эффект конденсации существенно зависит от плотности частиц и снижается по мере ее увеличения, что может привести к уменьшению эффективности пылеулавливания в этих аппаратах в сравнении с условиями без конденсации. Конденсация весьма существенно влияет на эффективность

пылеулавливания для частиц, у которых инерционное число Стокса $Stk_s > 0,1$, для субмикронных частиц это влияние выражено слабо. Эффект конденсации повышается с ростом толщины слоя конденсата на частицах пыли. Уровень этого повышения может быть установлен в результате решения комплексной задачи о тепломассообмене и процессе сепарации частиц при конденсации водяных паров на них внутри сферических и цилиндрических пузырей, формирующихся на газораспределительных решетках ПА и ЦБА.

Работа выполнена при поддержке научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (Проект 211.06.03.038).

Литература:

1. Шиляев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999.
2. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – М.: Химия, 1972.
3. Шиляев М.И. Интенсификация процессов пылеулавливания при производстве стройматериалов // Материалы международного научно – технического семинара «Нетрадиционные технологии в строительстве». – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2001.
4. Аппроксимация опытных данных и номограмма для расчета эффективности пылеулавливания в пенном аппарате/ М.И. Шиляев, Д.Н. Шашко, Д.Г. Серебряков, А.И. Поливанов // Труды НГАСА, 2000, Т.3, №2(9).