

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD по специальности 8D07180 – Технологические машины и оборудование (по отраслям)

Абжапбарова Абая Акилбековича

Гидродинамика, теплообмен и пылеулавливание в однозонных и двухзонных комбинированных газоочистных аппаратах

Цель диссертационного исследования: разработка научных основ гидродинамики, процессов пылеулавливания и теплообмена в одноступенчатых и двухступенчатых (однозонных и двухзонных) аппаратах, с двухсторонним подводом газового потока, ударно-вихревого и циклонно-вихревого действия, создание научно-обоснованных методов расчета, рекомендаций по эксплуатации и проектированию, проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленность.

Задачи исследования:

- классификация одноступенчатых и двухступенчатых теплообменных и пылеулавливающих аппаратов;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, теплообмена и пылеулавливания аппарата ударно-вихревого действия с двухсторонним подводом газового потока и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, теплообмена и пылеулавливания аппарата ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания;
- экспериментальное исследование гидродинамических характеристик, теплообмена и пылеулавливания аппарата циклонно-вихревого действия и получение расчетных зависимостей гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости, газосодержания слоя, коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и эффективности пылеулавливания;
- разработка научно-обоснованных инженерных методик расчета разработанных аппаратов и рекомендаций по проектированию и эксплуатации;
- проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленность.

Методы исследования: методы физических исследований для получения опытных данных по гидродинамике (гидравлического сопротивления, количества удерживаемой жидкости), коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, эффективности пылеулавливания, методы математического моделирования.

Основные положения (доказанные научные гипотезы и другие выводы, являющиеся новыми знаниями), выносимые на защиту:

- на основе анализа механизмов взаимодействия потоков газа и жидкости предложена классификация одноступенчатых и двухступенчатых теплообменников и пылеулавливающих аппаратов;

- при двухстороннем подводе газа, исходя из выявленных гидродинамических закономерностей ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, эжекции жидкости и вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления зоны эжекции и вихревой зоны контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- исходя из выявленных закономерностей ударного взаимодействия газового потока с жидкостью, вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки двухступенчатого аппарата ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления ударной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- исходя из условий движения теплоносителя в трубах с учетом местных сопротивлений и сопротивлений на трение получено уравнение для расчета гидравлического сопротивления;

- исходя из выявленных закономерностей движения газового потока по спирали, вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости в объеме регулярно размещенной насадки двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия, получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления циклонной и вихревой ступеней контакта, их общего сопротивления, количества удерживаемой жидкости и газосодержания слоя насадочной зоны;

- на основе турбулентно-диффузионного механизма улавливания твердых частиц на каплях жидкости дано математическое описание турбулентного и диффузионного осаждения твердых частиц в зоне удара и регулярно размещенной насадки, а, используя диссипативный подход, получены расчетные зависимости для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи;

- на основе центробежно-инерционного механизма улавливания твердых частиц разработана математическая модель центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени двухступенчатого аппарата циклонно-вихревого действия.

Описание основных результатов исследования.

При проведении лабораторных исследований разработанных конструкций аппаратов: одноступенчатого двухзонного аппарата с регулярно размещенной насадкой и двухсторонним подводом газового потока (АДПП), двухступенчатых аппаратов ударно - вихревого действия с регулярной трубчатой насадкой (АУВД с ТН) и циклонно-вихревого действия (АЦВД) получены графические зависимости и расчетные уравнения гидродинамических характеристик, параметров теплообмена и пылеулавливания.

Гидродинамические характеристики. Насадочная зона аппаратов АДПП и АЦВД содержит пластинчатую насадку, в аппарате АУВД с ТН размещена

трубчатая насадка. **Гидравлическое сопротивление насадочной зоны** определяется по известной зависимости Дарси-Вейсбаха. Входящий в нее коэффициент сопротивления для пластинчатой насадки имеет вид:

$$\xi_L = 0,43 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \frac{\text{Re}_{ж}^{0,25}}{\text{Re}_z^{0,1}}, \quad (1)$$

трубчатой

$$\xi_L = 0,195 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \text{Re}_{ж}^{0,1}, \quad (2)$$

где θ_b - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении; θ_p - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении; $\text{Re}_ж$ и Re_r – критерии Рейнольдса по газу и жидкости, отнесенные к эквивалентному диаметру насадки.

Количество удерживаемой жидкости (КУЖ) аппаратов АДПП и АУВД с ТН:

$$h_o = A \cdot \xi_L \cdot \frac{H}{t_g} \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot \varepsilon_0^2}, \quad (3)$$

где опытный коэффициент А: для АДПП - 0,506; для АУВД с ТН - 0,65.

КУЖ аппарата АЦВД:

$$h_o = (h_{пл} + h_k) \cdot \frac{H}{t_b}, \quad (4)$$

в котором пленочная составляющая $h_{пл} = \delta_{пл} (1 - \varepsilon_0)$. Капельная составляющая h_k определяется на основе балансового уравнения сохранения энергии:

$$h_k = 0,88 \cdot \xi_L \cdot \frac{\rho_r W_r^2}{2g\rho_{ж}} \cdot \frac{(2 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2}. \quad (5)$$

Для определения **гидравлического сопротивления зоны эжекции** аппаратов АДПП и АУВД с ТН получено уравнение:

$$\Delta P_s = \lambda \frac{\rho_r \cdot W_{нар}^2}{2} + \rho_{ж} g [(1 - \varphi_s) h_o]. \quad (6)$$

где φ_s – газосодержание в зоне эжекции; h_o - динамический уровень жидкости (м) для АДПП определяется через диаметр и глубину образующейся воронки; для АУВД с ТН определяется через количество вытесненной в насадочную зону жидкости.

Гидравлическое сопротивление циклонной ступени определяется исходя из аддитивности сопротивлений. При этом для: входного участка ($\xi_{вх} = 3,32$); кольцевой зоны ($\xi_{кольц} = 4,1$); выходного участка ($\xi_{вых} = 5,7$).

Параметры теплообмена. Для расчета *коэффициентов массоотдачи в газовой фазе* получены уравнения:

для АДППП:

$$\beta_{zs} = 5,53 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{D_z^2 \cdot C_k \cdot U_z^3 \cdot (h_0 - h_{nl})}{\varphi_{яч} (t_b - h_{nl}) \cdot d_k \cdot \nu_z} \right]^{1/4} \quad (7)$$

для АУВД с ТН:

$$\beta_{zs} = 10,4 \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot \left[\xi_L \cdot \frac{D_z^2 \cdot U_z^3}{\varphi_{яч} \cdot t_b \cdot \nu_z} \right]^{1/4} \quad (8)$$

для АЦВД:

$$\beta_{гс} = 6,22/(1-\varepsilon)^{1/4} \cdot \left[D_r^2 \cdot \frac{\xi_L (1-\varepsilon) \cdot U_r^3}{\delta_{пл} \cdot \varphi_{яч} \cdot \nu_r} \right]^{1/4} \quad (9)$$

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по формулам:

для АУВД с ТН:

$$\alpha = 7,28 \cdot \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/4} \cdot c_p \cdot \left[\xi_L \cdot \frac{D_r^2 \cdot U_r^3}{\varphi_{яч} \cdot t_b \cdot \nu_r} \right]^{1/4} \quad (10)$$

для АЦВД:

$$\alpha = 4,35/(1-\varepsilon)^{1/4} \cdot c_p \cdot \left[D_r^2 \cdot \frac{\xi_L (1-\varepsilon) \cdot U_r^3}{\delta_{пл} \cdot \varphi_{яч} \cdot \nu_r} \right]^{1/4} \quad (11)$$

Параметры пылеулавливания. Для расчета эффективности пылеулавливания использована математическая *модель инерционно-диффузионного осаждения твердых частиц*. С использованием теории о локально-изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова получены уравнения для расчета коэффициентов турбулентной диффузии:

для зоны эжекции в аппаратах АДППП и АУВД с ТН:

$$D'_m = B_1 \cdot (\xi_{nam})^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_{эж}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{\Delta h} \right)^{1/3} \cdot d_{k_1}^{4/3} \cdot W_{nam} \cdot Stk, \quad (12)$$

где $B_1 = 4,5 \cdot 10^{-2}$ – для АДППП; $B_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ – для АУВД с ТН;

для насадочной зоны аппаратов АДППП, АУВД с ТН, АЦВД:

$$D''_m = B_2 \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1-\varepsilon_0)^{1/3} \cdot \left(\frac{H}{t_b} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_{эж}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{h_0} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_z \cdot Stk, \quad (13)$$

где $B_2 = 8,85 \cdot 10^{-2}$ – для АДППП; $B_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ – для АУВД с ТН; $B_2 = 8,38 \cdot (1-\varphi)$ – для АЦВД.

На основе центробежно-инерционного механизма улавливания твердых частиц

разработана математическая *модель центробежного и инерционного осаждения частиц* в циклонной ступени аппарата АЦВД. Входящий в нее коэффициент, зависящий от конструктивных соотношений сухой ступени аппарата, рассчитывается по уравнению:

$$C_{\kappa} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2}{a \cdot \varepsilon_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D_{\text{ц}}} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{2 \cdot h_{\text{T}}}{D_{\text{ц}}} - \frac{h_{\text{г}}}{D_{\text{ц}}} \right) + \left[\left(\frac{d}{D_{\text{ц}}} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{D_{\text{ц}}} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{4 \cdot H_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}} + \frac{4 \cdot H_{\kappa}}{D_{\text{ц}}} \right) \quad (14)$$

Конструктивные соотношения в уравнении имеют вид: $a = 0,66 \cdot D_{\text{ц}}$; $\varepsilon_1 = 0,26 \cdot D_{\text{ц}}$; $d = 0,59 \cdot D_{\text{ц}}$; $d_1 = 0,4 \cdot D_{\text{ц}}$; $h_{\text{T}} = 1,74 \cdot D_{\text{ц}}$; $h_{\text{г}} = 0,3 \cdot D_{\text{ц}}$; $H_{\text{ц}} = 2,26 \cdot D_{\text{ц}}$; $H_{\kappa} = 2 \cdot D_{\text{ц}}$.

Обоснование новизны и важности полученных результатов.

Важность классификации одноступенчатых и двухступенчатых теплообменников и пылеулавливающих аппаратов заключается в учете традиционных механизмов взаимодействия потоков, а также определение пути их возможной комбинации.

Новизной уравнений для расчета гидравлического сопротивления ударной и вихревой ступеней контакта, количества удерживаемой жидкости, расчетных зависимостей для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, математического описания турбулентного и диффузионного осаждения твердых частиц в зоне удара и регулярно размещенной насадки является то, что они базируются на выявленных закономерностях ударного и вихревого взаимодействия газового потока с жидкостью.

Новизной уравнений для расчета гидравлического сопротивления циклонной и вихревой ступеней контакта, количества удерживаемой жидкости, расчетных зависимостей для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и теплоотдачи, математического описания турбулентного и диффузионного осаждения твердых частиц в зоне регулярно размещенной насадки, а также модели центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени является то, что они учитывают закономерности движения газового потока по спирали и вихревое взаимодействие газового потока с жидкостью.

Важность полученных уравнений состоит в том, что они составляют основу инженерных методик расчета и, наряду с рекомендациями по проектированию и эксплуатации позволяют рассчитывать промышленные образцы.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам. Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований Комитета науки МН и ВО РК по приоритету «Рациональное использование водных ресурсов, животного и растительного мира, экология», по специализированному научному направлению «Системы очистки сточных вод, газоочистки и пылеулавливания».

Описание вклада докторанта в подготовку каждой публикации. По теме диссертации опубликовано 30 статей. Общий объем вклада докторанта составляет 55-60%. Вклад в статьи представляют такие составляющие, как проведение экспериментальных исследований, обработка результатов в виде табличных значений и графических зависимостей, полученные расчетные уравнения.