

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание ученой степени доктора философии PhD по специальности 6D072400 – Технологические машины и оборудование

**Торский Андрей Олегович**

### **Разработка и расчет циклонно-вихревого аппарата для проведения совмещенных процессов массообмена и пылеулавливания**

**Актуальность диссертационного исследования.** Аппараты мокрого типа, к числу которых относятся полые форсуночные скрубберы, тарельчатые и насадочные (со стационарной насадкой) аппараты, различных видов ротоклоны, скрубберы Вентури нашли довольно широкое применение для улавливания слабослипающихся пылей и абсорбции легкорастворимых газов. Они, как правило, имеют одноконтурную систему орошения. Однако при комплексной очистке газов, содержащих адгезионные пыли, их применение ограничено, т.к. возникают серьезные проблемы, связанные с зарастанием внутренних устройств отложениями, что негативно сказывается на эффективности и эксплуатационной надежности работы аппарата.

Аппараты комбинированного типа – инерционно-турбулентные с подвижной (регулярной) насадкой (ИТПН, содержащие зону ударно-инерционного взаимодействия потока газа с зеркалом жидкости и насадочную зону с газокапельным взаимодействием относятся к устройствам с внутренней циркуляцией жидкости с использованием одноконтурной системы орошения. При наличии в очищаемом газе растворимых пылей одноконтурная система орошения приводит к снижению степени абсорбции как легкорастворимых, так и плохорастворимых газов. Это объясняется присутствием в орошающем растворе добавочного растворенного компонента (не взаимодействующего с абсорбируемым газом), что понижает растворимость газов и ведет к повышению константы равновесия.

Указанная проблема решена в конструкции комбинированного аппарата с автономными контурами орошения, отдельно для каждой из зон – ударно-инерционной и насадочной, которые позволяют предотвратить образование отложений и повысить движущую силу процесса абсорбции. Вместе с тем, проведенные исследования показали, что комбинированный аппарат с автономными контурами орошения (один из которых использует ударный механизм) обладает значительным гидравлическим сопротивлением.

Нами для отдельного проведения процессов пылеулавливания и абсорбции разработана конструкция аппарата циклонно-вихревого действия, имеющего автономные ступени контакта. В нижней ступени контакта используется центробежный механизм улавливания пыли в отсутствие орошения жидкостью, а в верхней ступени контакта осуществляется доулавливание пыли и процесс абсорбции с использованием закономерностей вихревого взаимодействия газа и жидкости.

Вместе с тем, отсутствие соответствующих исследований и научно обоснованных методов расчета сдерживает внедрение аппарата циклонно-вихревого действия в промышленность.

В связи с этим, проведение исследований процессов пылеулавливания и массообмена, разработка методологии расчета и проектирования аппаратов циклонно-вихревого действия, рекомендаций по их эксплуатации являются актуальными.

**Предметом исследований** явились гидродинамические закономерности, параметры пылеулавливания и массообмена.

**Цель работы:** разработка научных основ процессов пылеулавливания и массообмена в аппарате циклонно-вихревого действия, создание научно-обоснованного метода расчета и проектирования, проверка полученных результатов в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленность.

**Научная новизна исследования:**

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

- с использованием балансовых уравнений, теории о локальной изотропной турбулентности и применяя диссипативный подход, получены уравнения для определения толщины пленки на поверхности пластинчатых насадочных элементов, диаметра струй и среднего диаметра капель;

- на основе центробежно-инерционного механизма улавливания твердых частиц разработана математическая модель центробежного и инерционного осаждения частиц в циклонной ступени аппарата, базирующаяся на уравнениях для определения конструктивных соотношений ступени контакта и модифицированного инерционного параметра, характеризующего состояние пылегазовой смеси;

- с учетом турбулентно-диффузионного механизма улавливания твердых частиц на каплях жидкости дано математическое описание турбулентного и диффузионного осаждения частиц в насадочной зоне аппарата, базирующееся на уравнении для определения коэффициента турбулентной диффузии частиц с учетом степени увлечения их турбулентными пульсациями;

- используя диссипативный подход, получена расчетная зависимость для определения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей движения газового потока по спирали, вихревого взаимодействия потоков в объеме регулярно размещенной насадки научно обоснована методология расчета аппарата циклонно-вихревого действия для проведения процессов пылеулавливания и абсорбции.

**Практическая ценность.** Разработана конструкция аппарата циклонно-вихревого действия, защищенная патентом РК №33662.

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации аппаратов циклонно-вихревого действия для проведения процессов пылеулавливания и абсорбции.

**Публикации по теме исследования.** По теме диссертации опубликовано 10 статей, из них 6 статей в материалах международных конференций, 1 статья в издании входящем в международную базу научных журналов SCOPUS (по направлению: Engineering: General Engineering. Процентиль – 31), 3 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, получен 1 патент РК. Содержание статей охватывает основное содержание диссертации.

**Во введении** дана оценка современного состояния решаемой научной проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки и метрологическом обеспечении диссертации, актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами, цель, объект и предмет, задачи исследования, методологическая база, положения, выносимые на защиту, практическая ценность и апробация практических результатов.

**В первом разделе** проведен анализ работы газоочистного оборудования при использовании центробежного и вихревого взаимодействия потоков, а также методики их расчета. На основании проведенного анализа осуществлена постановка задач исследований.

**Во втором разделе** дано описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических параметров, а также методик проведения экспериментов.

Диапазон изменения режимных параметров в проводимых исследованиях: скорость газа  $w_r$  - 1÷5 м/с в вихревой ступени, что соответствует скорости газа на входе в циклонную ступень  $W_{вх} = 4,575 ÷ 22,875$  м/с; плотность орошения  $L$  - 25÷100 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

Даны конструктивные соотношения циклонной и вихревой ступеней контакта.

Приведены результаты исследований режимных параметров на гидродинамические характеристики циклонной ступени аппарата. Отмечено, что рост гидравлического сопротивления при увеличении скорости газа обусловлен ростом динамического напора и потерями, связанными с изменением направления движения газа и потерями на трение.

Для изучения закономерностей взаимодействия газовой и жидкой фаз в вихревой зоне аппарата циклонно-вихревого действия проведены исследования гидродинамических параметров (гидравлического сопротивления и количества удерживаемой жидкости), визуальные наблюдения и фотографирование структуры слоя.

Исследования проведены при неизменных конструктивных параметрах пластинчатой насадки ( $t_v/b=2$ ;  $t_p/b=2$ ) в заданном диапазоне режимных параметров.

При изменении скорости газового потока отмечено наличие трех гидродинамических режимов: пленочно-капельный, капельный и брызгоуноса. С ростом скорости газа растет динамический напор, а это способствует увеличению гидравлического сопротивления и удержанию большего количества жидкости в объеме насадки, тогда как расчетные значения газосодержания снижаются. Увеличение плотности орошения способствует росту количества удерживаемой жидкости и снижению расчетных значений газосодержания.

Для расчета гидравлического сопротивления циклонно-вихревого аппарата предложено уравнение:

$$\Delta P_{an} = \Delta P_{\psi} + \Delta P_L \quad (1)$$

Гидравлическое сопротивление циклонной ступени определяется по уравнению:

$$\Delta P_{\psi} = \Delta P_{вх} + \Delta P_{кольц} + \Delta P_{вых}, \quad (2)$$

Для расчета гидравлического сопротивления составляющих циклонной ступени контакта  $\Delta P_{вх}$  - входного участка;  $\Delta P_{кольц}$  - кольцевой зоны;  $\Delta P_{вых}$  - выходного участка предложена классическая расчетная зависимость в которой нижние индексы при  $\Delta P$ ,  $\xi$  и  $w$  соответствуют наименованию рассчитываемого участка. В результате проведенных исследований получены опытные значения коэффициентов сопротивления:  $\xi_{вх} = 3,32$ ;  $\xi_{кольц} = 4,1$ ;  $\xi_{вых} = 5,7$ .

Гидравлическое сопротивление насадочной зоны определяют по известному уравнению для аппаратов с регулярной подвижной насадкой. Входящий в нее коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$\xi_L = 0,7 \cdot \theta_v \cdot \theta_p \cdot \frac{Re_{ж}^{0,25}}{Re_r^{0,1}} \quad (3)$$

Количество удерживаемой жидкости (КУЖ) определяют по уравнению:

$$h_0 = (h_{пл} + h_k) \cdot \frac{H}{t_b}, \quad (4)$$

в которой пленочная составляющая КУЖ:

$$h_{пл} = \frac{\delta_{пл} \cdot b^2}{t_p^2} \quad (5)$$

Капельная составляющая (КУЖ):

$$h_k = 0,88 \cdot \xi_L \frac{\rho_r W_r^2}{2g\rho_{ж}} \cdot \frac{(2 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2} \quad (6)$$

Газосодержание рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_0}{H} \quad (7)$$

Выражения для структурных составляющих жидкой фазы  $\delta_{пл}$ ,  $U_{стр}$ ,  $d_{стр}$  и  $d_k$ , полученные для насадочной зоны аппарата циклонно-вихревого действия учитывают особенности режимных и конструктивных параметров аппарата, а также физические свойства взаимодействующих потоков.

**В третьем разделе** приведена методика исследования общей и фракционной эффективности процесса пылеулавливания и результаты исследований в циклонной и вихревой ступенях контакта.

Для расчета эффективности циклонной (сухой) ступени предложена центробежно – инерционная модель, согласно которой:

$$\eta_c = 1 - \exp[-2(C_k \cdot \psi)^{1/(2n+2)}] \quad (8)$$

Коэффициент  $C_k$ , зависящий от конструктивных соотношений сухой ступени рассчитывается по уравнению:

$$C_k = \frac{\pi \cdot D_u^2}{a \cdot \sigma_1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D_u} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{2 \cdot h_r}{D_u} - \frac{h_g}{D_u} \right) + \left[ \left( \frac{d}{D_u} \right)^2 - \left( \frac{d_1}{D_u} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{4 \cdot H_u}{D_u} + \frac{4 \cdot H_k}{D_u} \right) \quad (9)$$

Модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси:

$$\psi = \frac{d_u^2 \cdot \rho_u \cdot W_{вх}}{18\mu_r \cdot D_u} (n+1), \quad (10)$$

$$\text{Величина } n = 1 - (1 - 0,0165 \cdot D_u^{0,14}) \cdot \left( \frac{T_r}{283} \right)^{0,3}.$$

Для расчета эффективности насадочной зоны аппарата разработана турбулентно-диффузионная модель осаждения твердых частиц:

$$\eta_m = 2,97 \cdot \left( \frac{W_r \cdot d_k}{D_T} \right)^{-1/4}. \quad (11)$$

Коэффициент турбулентной диффузии:

$$D_T = B_T \cdot (\xi_L)^{1/3} \cdot (1 - \varepsilon_0)^{1/3} \cdot \left(\frac{H}{t_B}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho_{жк}}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{h_0}\right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot u_r \cdot Stk, \quad (12)$$

где  $B_T = 8,38 \cdot (1 - \varphi)$  - корректирующий коэффициент;  $Stk = \frac{\rho_q \cdot d_q^2 \cdot u_q}{18\mu_r \cdot d_k}$  - критерий Стокса.

Общая эффективность циклонно-вихревого аппарата с учетом эффективности сухой и мокрой ступеней может быть рассчитана по формуле:

$$\eta_{общ} = 1 - (1 - \eta_c)(1 - \eta_m). \quad (13)$$

**В третьем разделе** приведены методика проведения и результаты исследований массообменных характеристик аппарата циклонно-вихревого действия в зависимости от режимных параметров. При этом отмечена аналогия изменения полученных кривых с кривыми гидродинамических параметров.

Для расчета коэффициентов массоотдачи в газовой фазе, исходя из диссипативного подхода, основных положений теории о локальной изотропной турбулентности и первого закона Фика получено уравнение:

$$\beta_{гс} = B_r \left[ D_{\square}^2 \cdot \frac{\xi_L(1 - \varepsilon) \cdot U_{\square}^3}{\delta_{\square} \cdot \varphi_{\square} \cdot \nu_{\square}} \right]^{1/4}, \quad (14)$$

где  $B_r = 6,44/(1 - \varepsilon)^{1/4}$  - коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем.

**В пятом разделе** приведены рекомендации по проектированию, которые содержат сведения о выборе режимных и конструктивных параметров, а также результаты испытаний и внедрения циклонно-вихревого аппарата.

По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленного циклонно-вихревого аппарата, которая внедрена на АО «Актюбинский завод хромовых соединений» в технологической схеме очистки газов, отходящих от сушилки КС в производстве сульфата хрома. При этом снижена концентрация выбросов пыли до  $C_{\text{цикл.вихр}} = 0,088 \text{ г/с}$ , что в 4,6 раза ниже нормативных показателей.

**В заключении** даны краткие выводы по результатам диссертационных исследований, оценка полноты решений поставленных задач, разработаны рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов, дана оценка технико-экономической эффективности внедрения и научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.