



УДК 66.074.1

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕГО АППАРАТА С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

•••••

COMPUTER STUDY OF THE EFFICIENCY OF A DUST COLLECTOR WITH A MOVABLE NOZZLE

Рахмонов Тойир Зойирович

доктор технических наук, доцент,
главный специалист по механике,
Отдел проектирования,
ООО «Лукойл-Узбекистан Оперейтинг Компани»
trahmonov@lukoil-international.uz

Рахмонов Уктам Камолович

доктор философии (PhD) по техническим наукам,
главный специалист отдела «Управление докторантурой,
работа с одаренными студентами и молодыми
исследователями»,
Министерство высшего и среднего
специального образования Республики Узбекистан
u.raxmonov72@gmail.com

Rakhmonov Toyir Zoyirovich

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Chief mechanical specialist of
Design department,
LUKOIL Uzbekistan Operating Company LLC
trahmonov@lukoil-international.uz

Rakhmonov Uktam Kamolovich

Doktor of Philosophy (PhD)
Technical Sciences,
Chief Specialist of the Department of
Scientific Researches and developing of
innovative activities,
Ministry of Higher and Secondary Specialized
Education of the Republic of Uzbekistan
u.raxmonov72@gmail.com

Аннотация. В статье приводятся результаты компьютерного эксперимента по определению основных характеристик нового пылеулавливающего аппарата с подвижной насадкой. Теоретическим путем определены оптимальные значения рабочих параметров процесса пылеулавливания и высота рабочей зоны прямооточного аппарата, соответствующие максимальным значениям эффективности осаждения частиц субмикронного размера. Предложено уравнение для определения эффективности пылеулавливания в аппарате с учетом эффективности различных стадий осаждения. Полученные результаты служат основой при проведении исследований нового пылеулавливающего аппарата на лабораторных и промышленных установках.

Annotation. The article presents the results of the computer experiment to determine the basic characteristics of a new dust separation apparatus with a movable showerheads. Theoretically determined optimum values of the operating parameters of dust separation process and the height of the working area once-through system, the respective maximum values of deposition efficiency of submicron size particles. An equation is proposed to determine the dust collecting efficiency of the device considering effectiveness of the various deposition steps. The results serve as a basis for the research of a new dust separation device on laboratory and industrial installations.

Ключевые слова: пылеулавливающий аппарат, частицы субмикронного размера, компьютерный эксперимент, эффективность осаждения частиц, метод очистки, подвижная насадка, оптимальные рабочие параметры, скорость газа, плотность орошения.

Keywords: dust collection apparatus, particles of submicron size, the effectiveness of deposition of particle, purification method, a movable showerheads, optimum operating parameters, gas velocity, a density of irrigation.

Одними из наиболее распространенных техногенных загрязнителей атмосферного воздуха являются взвешенные частицы пыли, содержащиеся в отходящих газах промышленных предприятий.

Очевидно, что решение задачи снижения выбросов пыли в окружающую среду лежит в области усовершенствования существующего, а также разработки и внедрении нового газоочистного оборудования.

Немаловажной задачей является создание методов расчета основных характеристик пылеулавливающих аппаратов, позволяющих максимально сократить проведение экспериментальных исследований разработанного оборудования за счет применения современной компьютерной техники и программных комплексов.

Существуют два основных метода расчета мокрых пылеулавливателей: фракционный и энергетический [1].

Первый базируется на знании дисперсного состава пыли на входе в аппарат и кривой эффективности пылеулавливателя, полученной при определенном гидромеханическом режиме. В соответствии данного метода, эффективность работы конкретного аппарата характеризуется двумя параметрами: d_{50} – диаметр частиц пыли, осаждаемых в аппарате с эффективностью 50 %, мкм; и IgG_{η} –



стандартное отклонение функции распределения фракционных коэффициентов пылеулавливания для данного типа аппарата.

Энергетический метод расчета основан на зависимости эффективности работы пылеулавливателя от затрат энергии K на осуществление процесса очистки газов.

$$n = \ln[1/(1-\eta)] = BK^x. \quad (1)$$

Значения коэффициентов B и x зависят исключительно от вида улавливаемой пыли и не зависят от конструкции, размера и типа пылеулавливателя. При улавливании взвешенных частиц за счет инерционного механизма осаждения величину K обычно рассчитывают по формуле

$$K = \Delta P + P_{\text{ж}} \frac{L}{G} = \Delta P + P_{\text{ж}} m, \quad (2)$$

где m – удельное орошение м^3 жидкости м^3 газа; ΔP – гидравлическое сопротивление мокрого пылеуловителя, Па; P – давление распыляемой жидкости, Па; L – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{час}$; G – расход газа, $\text{м}^3/\text{час}$.

В последние годы появились работы [2], указывающие на наличие зависимости величины d_{50} от энергетических затрат, называя метод вероятностно-энергетическим.

Предлагается применить данный метод получения обобщенной зависимости $d_{50} = f(k)$ для аппарата очистки запыленных газов с U-образным вводом газа [3] разработанного нами.

Прямоточные пылеулавливающие аппараты с витающей насадкой (ВН) является эффективным аппаратом для улавливания пыли из газов и особенно применим в тех случаях, когда происходит образование взвесей и осадков [4], вследствие чего аппараты других типов непригодны. При работе аппарата не забивается отложениями даже при наличии в газе смолистых веществ. Однако, практический опыт работы аппарата с ВН с сильно слипающимися аэрозолями, например аэрозолями краски, показывает, что при остановках аппарата находящаяся в опорной решетке элементы насадки, независимо от формы и материала, слипаются друг с другом, создавая единый слой, что сильно снижает надежность работы аппарата.

С целью устранения перечисленных недостатков, нами разработано устройство очистки запыленных газов [3]. В аппарате с U-образным вводом газа отсутствует опорная решетка, что снижает энергозатраты при рабочем режиме. При этом все положительные функциональные характеристики аппарата с ВН сохраняются, U-образный патрубок ввода газа не препятствует свободному витанию элементов насадки в рабочей зоне. Кроме того, при остановках аппарата, насадки под действием сил тяжести падают вниз, и находятся в слое жидкости U-образного патрубка, что предотвращает слипание элементов насадок между собой.

Для широкого промышленного использования представляют интерес исследования показателей пылеулавливания в аппарате с U-образным вводом газа. По характеру организации гидродинамического режима работ, несмотря на конструктивные особенности, исследуемый аппарат является разновидностью аппаратов с подвижной насадкой.

По данным работы [5], процесс улавливания пыли в аппарате с ПН состоит из трех стадий. Рассмотрим эти стадии применительно к аппарату с U-образным вводом газа.

Первая стадия – осаждение частиц в U-образном патрубке, обусловленное механизмом инерционного столкновения. При пуске в работу аппарата, запыленный газ, проходя через U-образный патрубок, захватывает и уносит в рабочую зону цилиндрические насадки и жидкость. Дальнейший процесс происходит в рабочей зоне пылеулавливающего аппарата.

Таким образом, степень улавливания η_1 в первой стадии незначительна, особенно при улавливании частиц размером менее 10 мкм и может не учитываться [6]. Однако можно предположить, что при изменении направления и скорости запыленного газового потока происходит укрупнение мелких частиц, за счет инерционного столкновения.

Вторая стадия – улавливание взвешенных частиц, обусловленное инерционными силами, возникающими при набегании газового потока на смоченную поверхность взвешенных насадок:

$$\eta_2 = 4,9 \text{Stk}^{1/2}, \quad (3)$$

где Stk – критерий Стокса, определяется по уравнению

$$\text{Stk} = \frac{d_{50}^2 \rho v_r}{18 \mu_r d_k} \quad (4)$$

при условии $\eta = 0,5$

где ρ – плотность частиц пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_r – скорость газа, $\text{м}/\text{с}$; μ_r – динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; d_k – диаметр капель, м.



Третья стадия – улавливание в слое витающей насадки, и характеризуется инерционно – турбулентным механизмом.

Для получения уравнения принимаем следующие допущения:

- Аппарат с витающей насадкой работает в устойчивом режиме.
 - Все элементы кольцевой насадки одинаковы.
 - Газовые, жидкостные потоки и насадка равномерно распределены по сечению аппарата.
- С учетом допущений, эффективность очистки в основной стадии определяется по формуле:

$$\eta_3 = \frac{U_{cp} d_{50}^2 \rho H_g}{\mu d_k}, \quad (5)$$

где H_g – высота динамического слоя подвижной (витающей) насадки.

Значение V_g , H_g , ΔP принимаем на основании экспериментов.

При проведении расчетов эффективности особое значение имеет параметр d_{50} (мкм), который рассчитывали по формуле из [2]:

$$d_{50} = 5945 K^{-0,645} \rho_r^{-0,5}. \quad (6)$$

Величина K , включающая затраты энергии на преодоление гидравлического сопротивления аппарата ΔP и подачу орошающей жидкости, определена по формуле (2).

Поскольку орошающая жидкость в исследуемый аппарат подается за счет кинетической энергии газа под незначительными давлениями, и удельное орошение составляет в пределах $0,01 \div 0,1$, в уравнении (2) можно пренебречь вторым членом и принять $K \approx \Delta P$.

В экспериментах, d_r задавали в пределах $0,5 \div 2,5$ мкм, а диаметр капли определяли по формуле [49]

$$d_k = \frac{Re_B \nu}{V_B} \frac{1200}{U_{cp}^{3,3}}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости, m^2/c ; V_B – скорость витания капли, м/с, определяется по уравнению:

$$V_B = U_{cp}(1-i); \quad (8)$$

Re_B – критерий Рейнольдса при витании капли определяется по формуле:

$$Re_B = \frac{Ar}{(18 + 0,6\sqrt{Ar})}. \quad (9)$$

Критерий Архимеда Ar рассчитывается с использованием уравнения

$$Ar = \frac{q d_k^3 (\rho_j - \rho_r)}{\nu^2 \rho_r}. \quad (10)$$

Коэффициент скольжения i как отношение скорости жидкости к скорости газа имеет четкий физический смысл в прямоточных системах, и определяется по зависимости:

$$i = 2,04 \cdot 10^{-2} U_{cp} \sqrt{L}. \quad (11)$$

Таким образом, общее улавливание пыли по вероятностно-энергетическому методу составляет (при $\eta_1 = 0$)

$$\eta = \eta_2 + (1 - \eta_2) \eta_3. \quad (12)$$

Полученное уравнение позволяет определить эффективность пылеулавливания в аппарате с U-образным патрубком ввода газа с учетом эффективности различных стадий осаждения.

На основании обоснованных теоретических предпосылок с использованием вероятностно-энергетического метода разработан алгоритм расчета эффективности процесса улавливания пыли, применительно к аппарату с U-образным вводом газа [7]. В соответствии полученных уравнений (12) и алгоритма расчета нами проведен компьютерный эксперимент по определению эффективности осаждения частиц медианными размерами $0,5 \div 2$ мкм, в зависимости от скорости газового потока и плотности орошения. В эксперименте использовали частицы с плотностью 2320 кг/м^3 , скорость меня-



ли в пределах от 16 – до 20 м/с и плотность орошения в диапазоне 40–100 м³/м²·ч. (0,0056 ÷ 0,0168 м/с).

В эксперименте приняты стандартные условия в системе «вода-воздух».

Анализ полученных результатов зависимости эффективности осаждения частиц, различного размера (рис. 1–6) от плотности орошения показывает, что до значениях 8,4·10⁻³м/с наблюдаются низкие показатели эффективности осаждения частиц размером менее 1,5 мкм. При размере частиц 2 мкм и более можно получить стабильные значения эффективности осаждения в пределах 97–99 %. Значит, для эффективного улавливания частиц размером 1 мкм и менее наблюдается нехватка жидкости и требуется увеличение расхода жидкости.

Анализ результатов эффективности осаждения частиц от скорости газа можно наблюдать также по (рис. 1÷4). Для получения высоких результатов осаждения необходимо увеличить скорости газа до 18–20 м/с. При этом для сохранения времени контакта фаз требуется увеличить и плотность орошения. Данные выводы подтверждаются результатами фракционной эффективности (рис. 5). При скоростях более 17 м/с частицы размером 1 мкм и более улавливается в пределах 95 %, частицы от 1 мкм до 0,5 мкм – более чем 82 %, частицы размером от 0,5 мкм до 0,3 мкм в пределах 75 %. Уменьшение размера частиц менее 0,3 мкм приводит к резкому снижению эффективности осаждения.

При экспериментах принято, что физические характеристики обоих потоков – воздуха и воды, а также характеристика частиц, и конструктивные размеры пылеулавливающего аппарата остаются постоянными.

Машинный эксперимент продолжали, задавая постоянное значение скорости газа равной 18 м/с и плотности орошения 14·10⁻²м/с. При этом варьировали значением динамической высоты газожидкостного и насадочного слоя в пределах 1200 ÷ 2000 мм.

Результаты (рис. 6) показывает, что увеличения Н_г положительно влияет на эффективность очистки субмикронных частиц. Так, при Н_г = 2000 мм эффективность улавливания частиц размерами более 0,5 мкм достигает 100 %, а частиц размером менее 0,5 мкм превышает 93 %.

Это явление может быть объяснимо из физической картины процесса, так увеличение высоты динамического слоя Н_г приводит к увеличению поверхности контакта фаз и увеличивается путь и время прибивания частиц в газожидкостном слое.

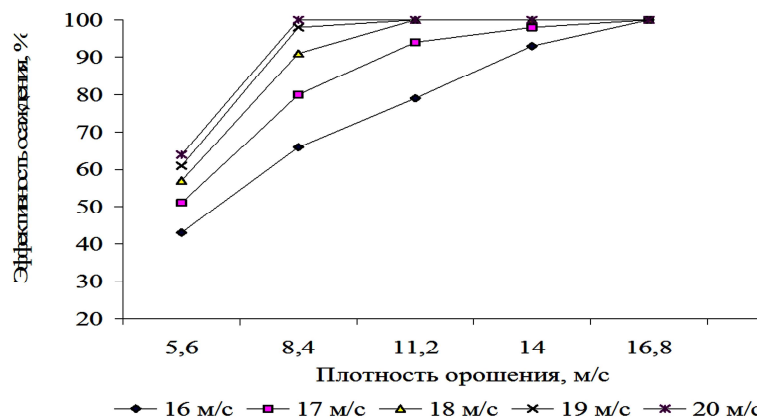


Рисунок 1 – Зависимость эффективности осаждения частиц $d_p = 2\text{мкм}$ от плотности орошения $L \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при скорости газа $U = 16 - 20 \text{ м/с}$

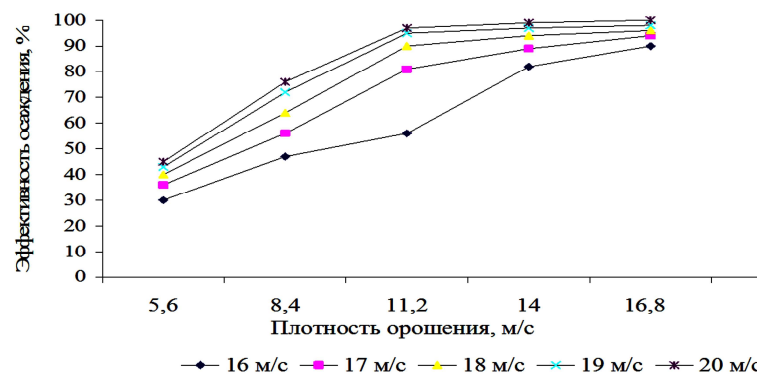


Рисунок 2 – Зависимость эффективности осаждения частиц $d_p = 1\text{мкм}$ от плотности орошения $L \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при скорости газа $U = 16 \div 20 \text{ м/с}$

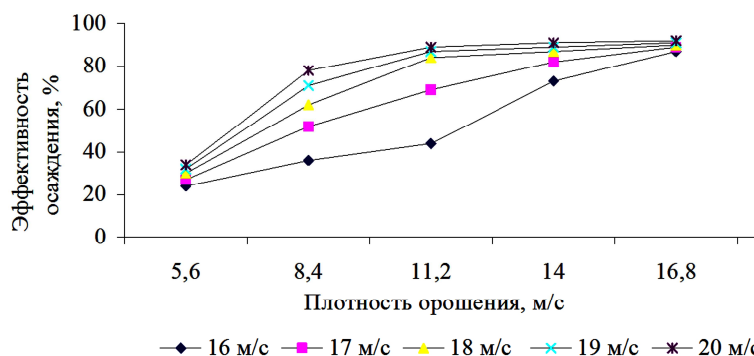


Рисунок 3 – Зависимость эффективности осаднения частиц $d_r = 0,5 \text{ мкм}$ от плотности орошения $L \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при скорости газа 16 – 20 м/с

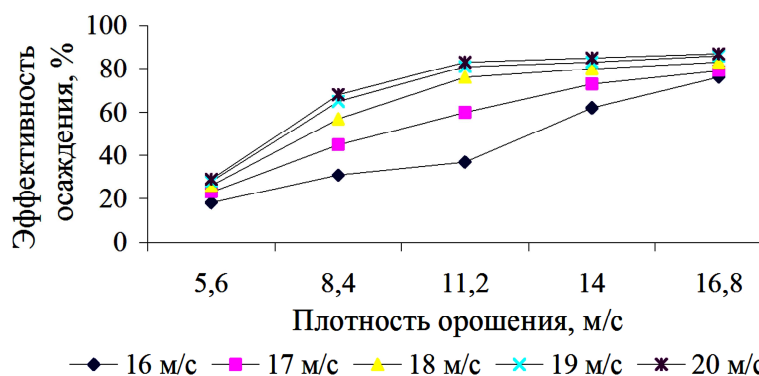


Рисунок 4 – Зависимость эффективности осаднения частиц $d_r = 0,3 \text{ мкм}$ от плотности орошения $L \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при скорости газа 16 – 20 м/с

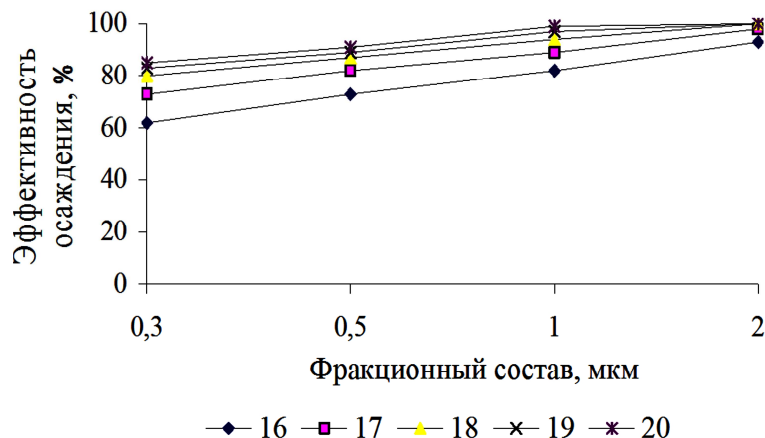


Рисунок 5 – Зависимость эффективности осаднения частиц от фракционного состава, $d_r, \text{ мкм}$ при скорости газа $U = 16 \div 20 \text{ м/с}$

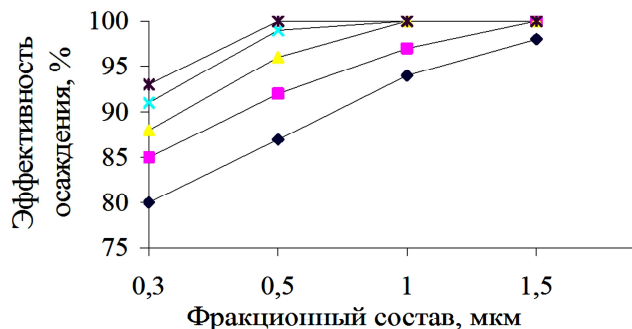


Рисунок 6 – Зависимость эффективности осаднения частиц $\eta \%$, от фракционного состава, $d_r, \text{ мкм}$ при различных значениях высоты динамического слоя $H_g, \text{ мм}$. скорость газа $U = 18 \text{ м/с}$



Таким образом, на основании обоснованных теоретических предпосылок с использованием вероятностно-энергетического метода и разработанного алгоритма расчета эффективности процесса улавливания пыли, применительно к аппарату с U-образным вводом газа, проведен компьютерный эксперимент и теоретическим путем определены оптимальные значения рабочих параметров процесса пылеулавливания и высота рабочей зоны прямооточного аппарата, соответствующие максимальным значениям эффективности осаждения частиц субмикронного размера.

Полученные результаты служат основой при проведении исследований на лабораторных и промышленных установках.

Литература:

1. Вальдберг А.Ю., Сафонов С.Г. Расчет эффективности сухих и мокрых механических пылеуловителей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 10. – С. 40–41.
2. Вальдберг А.Ю., Сафонов С.Г. Расчет циклонов с использованием вероятностно-энергетического метода // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2003. – № 10. – С. 14–19.
3. Рахмонов Т.З., Салимов З.С., Мухаммедов Б.И., Рахмонов У.К., Юлдашев Н.Х. Устройство для очистки запыленных газов / Государственная патентная агентство Узбекистана. Патент № IAP 038039. 12.12.2008 й.
4. Рахмонов Т.З., Салимов З.С., Умиров Р.Р. Мокрая очистка газов в аппаратах с подвижной насадкой. – Т.: Фан, 2004. – 160 с.
5. Заминян А.А., Рамм В.М. Абсорберы с псевдоожиженной насадкой. – М.: Химия, 1980. – 184 с.
6. Рахмонов У.К. Инерционно турбулентный механизм осаждения аэрозолей // Международная конференция «Современные проблемы газовой и волновой динамики». – М., 2009. – С. 83–84.
7. Рахмонов Т.З., Мирзарахимов М.С., Рахмонов У.К. Моделирование траектории капель в закрученном потоке // Узбекский химический журнал. – Ташкент, 2008. – № 2. – С. 288–291.

References:

1. Waldberg A.Yu., Safonov S.G. Calculation of the dry and wet mechanical dust collectors efficiency // Chemical and oil-and-gas machine building. – 2005. – № 10. – P. 40–41.
2. Waldberg A.Yu., Safonov S.G. Cyclone calculation using the probabilistic-energy method // Chemical and oil-and-gas machine building. – 2003. – № 10. – P. 14–19.
3. Rakhmonov T.Z., Salimov Z.S., Muhammedov B.I., Rakhmonov U.K., Yuldashev N.H. Device for dusty gases purification // State Patent Agency of Uzbekistan. Patent № IAP 038039. 12.12.2008 й.
4. Rakhmonov T.Z., Salimov Z.S., Umirov R.R. Wet cleaning of gases in the apparatuses with the moving nozzle. – T.: Fan, 2004. – 160 p.
5. Zaminyan A.A., Ramm V.M. Absorbers with a pseudo-liquidated nozzle. – M.: Chemistry, 1980. – 184 p.
6. Rakhmonov U.K. Inertial Turbulent Mechanism of Aerosol Deposition // International Conference «Modern Problems of Gas and Wave Dynamics». – M., 2009. – P. 83–84.
7. Rakhmonov T.Z., Mirzarakhimov M.S., Rakhmonov U.K. Drop trajectory modeling in a swirling flow // Uzbek Chemical Journal. – Tashkent, 2008. – № 2. – P. 288–291.