

УДК 621.928.9

Приемов С.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ В СКРУББЕРАХ ВЕНТУРИ

Запропоновано новий метод розрахунку ефективності вловлювання в скруббері Вентури аерозолів з невідомими фізико-хімічними параметрами.

Предложен новый метод расчета эффективности улавливания в скруббере Вентури аэрозолей с неизвестными физико-химическими параметрами.

A new method of calculation of the efficiency of aerosols recovery in Venturi scrubbers with unknowns physical chemical parameters is proposed.

$d$  – диаметр горловины;

$d_{50}$  – медианный диаметр пыли;

$K_T$  – расход энергии на очистку 1000 м<sup>3</sup> газа, (кДж);

$l$  – длина горловины;

$m$  – величина удельного орошения;

$Re_r, Re$  – критерии Рейнольдса, рассчитанные соответственно по  $d$  и  $\lambda_0$ ;

$t$  – температура;

$u_{ж}$  – динамическая скорость;

$V$  – скорость;

$\delta$  – величина «диффузионного пограничного слоя»;

$\varepsilon$  – скорость диссипации энергии турбулентного движения на единицу массы, равная ( $V^3/d$ );

$\eta$  – эффективность очистки;

$\lambda_0$  – внутренний колмогоровский масштаб турбулентности, равный  $(\nu_r/V_r)^{3/4}(d)^{1/4}$ ;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\rho$  – плотность;

$\sigma$  – стандартное отклонение распределения частиц пыли по размерам.

### Индексы верхние:

$r$  – расчет;

$\varepsilon$  – эксперимент.

### Индексы нижние:

$г$  – газ;

$п$  – пыль.

В технике пылеулавливания при оценке эффективности очистки в скрубберах Вентури особенности каждой пыли учитываются путем экспериментального определения значений коэффициентов ( $B, x$ ) в уравнении

$$\eta = 1 - \exp(-BK_T^x). \quad (1)$$

Однако, в ряде случаев такие данные отсутствуют и для их определения требуются значительные затраты времени и объемов исследований в конкретных производственных условиях.

В настоящей работе предлагается новый метод расчета эффективности улавливания пыли в скруббере Вентури, основанный на использовании определяющего влияния на эффективность улавливания пыли в механических скрубберах и в скруббере Вентури величины ( $\lambda_0$ ) [2].

Так, в табл. 1–2 приведены данные испытаний скруббера Вентури на пыли талька ( $d_{50} = 9$  мкм;  $\sigma_n = 2,33$ ;  $d = 0,076$  м;  $t_r = 20$  °С) [3] и П.А. Коузова по оценке эффективности очистки в коагуляционном мокром пылеуловителе КМП (скруббере Вентури) на кварцевой пыли ( $d_{50} = 8$  мкм;  $\sigma_n = 3,75$ ;  $d = 0,145$  м) [4].

В табл. 3 приведены результаты оценок значений парных коэффициентов корреляции различных факторов с величиной « $\eta$ ».

Ранжировка по величине коэффициентов корреляции между наиболее значимыми факторами и эффективностью очистки в различных по конструктивному выполнению скрубберах Вентури показывает, что наибольшее влияние на эффективность очистки от пыли оказывает величина диффузионного пограничного слоя, которая, как известно, прямо пропорциональ-

Табл. 1. Опыты по оценке эффективности очистки скруббера Вентури ( $d_{50} = 9$  мкм;  $\sigma_n = 2,33$ ;  $l = 0,3$  м;  $d = 0,076$  м;  $t_r = 20$  °С; ПЫЛЬ-ТАЛЬК) [3]

$V_r$ , м/сек	40	50	60	70	80
$\varepsilon$ , м <sup>2</sup> /сек	$0,88 \cdot 10^6$	$1,645 \cdot 10^6$	$2,842 \cdot 10^6$	$4,51 \cdot 10^6$	$6,74 \cdot 10^6$
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	9,87	7,72	6,73	6,0	5,42
$Re_r \cdot 10^5$	2,057	2,53	3,04	3,55	4,05
$u_*$ , м/с	1,81	2,19	2,58	2,97	3,35
$Re_{\lambda_0}$	0,957	0,982	1,01	1,035	1,056
$\delta = 2,3\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	18,1	15,4	13,5	12,0	10,9
$\eta$ , %	81	92,7	95,6	97,2	98,2

Табл. 2. Опыты П.А. Коузова по оценке эффективности очистки в скруббере КМП ( $d_{50} = 8$  мкм;  $\sigma_n = 3,75$ ;  $d = 0,145$  м;  $t_r = 20$  °С; ПЫЛЬ-КВАРЦ) [4]

$V_r$ , м/сек	20	30	40	50	60	70	80
$\varepsilon$ , м <sup>2</sup> /сек	55172	186206	441380	862000	1490650	2365000	3530000
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	16,9	11,7	9,1	7,36	6,23	5,41	4,79
$Re_r \cdot 10^5$	1,93	2,9	3,87	4,88	5,8	6,77	7,73
$u_*$ , м/с	0,887	1,28	1,66	2,04	2,408	2,77	3,13
$Re_{\lambda_0}$	0,96	1,01	1,0	1,098	1,134	1,12	1,192
$\delta = 2,3\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	39,0	26,8	20,9	17,0	14,3	12,5	11,0
$\eta$ , %	78,0	85,0	92,0	95,0	96,8	97,8	98,0

Табл. 3. Значения парных коэффициентов корреляции

Коэффициенты корреляции	Скруббер Вентури	КМП	Средние значения
$r_{\varepsilon, \eta}$	0,7648	0,756	0,76
$r_{Re_r, \eta}$	0,862	0,918	0,89
$r_{u_n, \eta}$	0,866	0,924	0,895
$r_{Re_{\lambda_0}, \eta}$	0,898	0,867	0,883
$r_{\delta, \eta}$	0,955	0,993	0,974

ная величине « $\lambda_0$ » [3].

На этом основании в данной работе предлагается новый метод оценки эффективности очистки в скрубберах Вентури от различных аэрозолей с неизвестными значениями коэффициентов в уравнении (1).

В основе такого метода лежит возможность прогнозирования эффективности очистки в скрубберах Вентури при различных значениях энергозатрат по результату всего лишь одного испытания на конкретной пыли, то есть при одном уровне энергозатрат и при известном значении величины « $\lambda_0^3$ ».

Последнее возможно в связи с тем, что отношения величин «проскоков» пыли проведен-

ного одного испытания к величине «проскоков» пыли в любых других режимах работы скруббера Вентури на этой пыли (при отличающихся значениях величин энергозатрат от испытанного одного режима ее работы) может быть рассчитано по зависимости:

$$\varepsilon^P = \varepsilon^3 (\lambda_0 / \lambda_0^3)^n, \quad (2)$$

где показатель степени « $n$ » определен в функции от величины « $d_{50}$ » и ниже приведены необходимые для его оценки данные по результатам обработки наиболее достоверных экспериментальных исследований.

В табл. 4 приведены данные исследования эффективности улавливания пыли в скруббере Вентури кварцевой пыли ( $d = 0,145$  м;  $d_{50} = 5$  мкм ;  $t_r = 20$  °C) [5].

Оптимальное значение показателя степени при отношении величин « $\lambda_0$ » для данных табл. 4 составило величину 4,2; при этом средняя ошибка расчетов величины « $\varepsilon^P$ » по предлагаемому новому методу, составила 11,8 %, что вполне удовлетворительно, поскольку не превышает рекомендуемых 15 % [6].

В табл. 5 приведены данные П.А. Коузова по исследованию эффективности улавливания кварцевой пыли в скруббере Вентури ( $d = 0,145$  м;  $t_r = 20$  °C;  $d_{50} = 8$  мкм;  $t_r = 20$  °C ;  $\rho_n = 2650$  кг/м<sup>3</sup>) [4].

Для приведенных в табл. 5 данных оптимальное значение показателя степени при отношении величин « $\lambda_0$ » составило величину 4; при этом средняя ошибка расчетов величины «проскока» по предлагаемому методу составила 3 %, что вполне удовлетворительно,

Табл. 4. Результаты исследования эффективности улавливания кварцевой пыли в скруббере Вентури [5] и расчетов значений « $\varepsilon^P$ »

$V_r$ , м/с	40	50	60	70	80
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	9,35	7,91	6,9	6,146	5,56
$m$ , л/м <sup>3</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\eta^3$ , %	87	93	96	97,7	98,8
«Проскок» пыли, $\varepsilon^3 = (100 - \eta^3)$ , %	13	7	4	2,3	1,2
$(\lambda_0 / 9,35 \cdot 10^{-6})^{4,2}$	1	0,495	0,279	0,172	0,113
«Проскок» пыли, $\varepsilon^P = 13(\lambda_0 / 9,35 \cdot 10^{-6})^{4,2}$	13	6,43	3,63	2,23	1,46

Табл. 5. Результаты исследования эффективности улавливания пыли в скруббере Вентури [4] и расчетов значений « $\varepsilon^P$ »

$V_r$ , м/с	40	50	60	70
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	9,35	7,91	6,9	6,146
$m$ , л/м <sup>3</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5
$\eta^3$ , %	93,5	96,5	98,0	98,8
«Проскок» пыли, $\varepsilon^3 = (100 - \eta^3)$ , %	6,5	3,5	2,0	1,2
$(\lambda_0 / 9,35 \cdot 10^{-6})^4$	1	0,495	0,279	0,172
«Проскок» пыли, $\varepsilon^P = 6,5(\lambda_0 / 9,35 \cdot 10^{-6})^4$	6,5	3,33	1,93	1,21

поскольку также не превышает рекомендуемых 15 % [6].

В табл. 6 приведены данные Л.И. Ещенко по исследованию эффективности улавливания в скруббере Вентури каолиновой пыли ( $d=0,066$  м;  $d_{50}=1,85$  мкм;  $\sigma_n=3$ ;  $\rho_n=2550$  кг/м<sup>3</sup>;  $t_r=102...133$  °С) [7].

Для приведенных в табл. 6 данных оптимальное значение показателя степени при отношении величин « $\lambda_0$ » составило величину 5,0; при этом средняя ошибка расчетов величины «проскока» пыли составила 10,2 %, что не превышает рекомендуемых 15 % [6].

В табл. 7 приведены данные по исследованию эффективности улавливания в скруббере Вентури тальковой пыли ( $d=0,076$  м;  $d_{50}=9,0$  мкм;  $\sigma_n=2,33$ ;  $\rho_n=2275$  кг/м<sup>3</sup>;

$t_r=70...100$  °С) [3].

Для приведенных в табл. 7 данных оптимальное значение показателя степени при отношении величин  $\lambda_0$  составило величину 4; при этом средняя ошибка расчетов величины «проскока» пыли составила 2,8 %, что не превышает рекомендуемых 15 % [6].

Обработка данных, приведенных выше таблиц, позволила оценить величину показателя степени « $n$ » в уравнении (2) в виде зависимости:

$$n = 1,9/d_{50} + 3,8. \quad (3)$$

Таким образом, расчет величины «проскока» пыли ( $\varepsilon^p$ ) в различных по энергозатратам режимах работы скруббера Вентури на пылях с известным дисперсным составом может осу-

Табл. 5. Результаты исследования эффективности улавливания пыли в скруббере Вентури [4] и расчетов значений « $\varepsilon^p$ »

$V_r$ , м/с	40	50	60	70
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	9,35	7,91	6,9	6,146
$m$ , л/м <sup>3</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5
$\eta^3$ , %	93,5	96,5	98,0	98,8
«Проскок» пыли, $\varepsilon^3 = (100-\eta^3)$ , %	6,5	3,5	2,0	1,2
$(\lambda_0/9,35 \cdot 10^{-6})^4$	1	0,495	0,279	0,172
«Проскок» пыли, $\varepsilon^p = 6,5(\lambda_0/9,35 \cdot 10^{-6})^4$	6,5	3,33	1,93	1,21

Табл. 6. Результаты исследования эффективности улавливания каолиновой пыли в скруббере Вентури [7] и расчетов значений « $\varepsilon^p$ »

$V_r$ , м/с	50	60	70	80
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	8,062	7,106	6,26	5,67
$m$ , л/м <sup>3</sup>	0,8	0,8	0,8	0,8
$\eta^3$ , %	75	88	92,5	95
«Проскок» пыли, $\varepsilon^3 = (100-\eta^3)$ , %	25	12	7,5	5
$(\lambda_0/8,062 \cdot 10^{-6})^5$	1	0,532	0,282	0,172
«Проскок» пыли, $\varepsilon^p = 25(\lambda_0/8,062 \cdot 10^{-6})^5$	1	13,3	7,06	4,3

Табл. 7. Результаты исследования эффективности улавливания тальковой пыли в скруббере Вентури [3] и расчетов значений « $\varepsilon^p$ »

$V_r$ , м/с	40	50	60	70	80
$\lambda_0 \cdot 10^6$ , м	9,87	7,72	6,73	6,0	5,42
$m$ , л/м <sup>3</sup>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\eta^3$ , %	81	92,7	95,5	97,5	98,2
«Проскок» пыли, $\varepsilon^3 = (100 - \eta^3)$ , %	19	7,3	4,5	2,5	1,8
$(\lambda_0/9,87 \cdot 10^{-6})^4$	1	0,374	0,216	0,136	0,091
«Проскок» пыли, $\varepsilon^p = 19(\lambda_0/9,87 \cdot 10^{-6})^4$	19	7,1	4,1	2,59	1,73

ществляться по зависимости:

$$\varepsilon^p = \varepsilon^3 (\lambda_0 / \lambda_0^3) \quad (4)$$

Одним из первых применений приведенного выше метода было внедрение 10 установок мокрого коагулятора Вентури (МКВ–15) единичной производительностью по очищаемому газу по 15 тыс. м<sup>3</sup>/ч на Фастовском заводе химического и нефтяного машиностроения «Красный Октябрь» при очистке аспирационных выбросов из дробеструйных камер (№ 860, 861) и мест шликерования участка № 2 эмалировочного цеха, а также ряда установок мокрого коагулятора Вентури (МКВ–15) на Киевском редукторном заводе.

Так, в связи с отсутствием данных об эффективности очистки скрубберами Вентури таких аэрозолей, на Фастовском заводе первоначально было проведено исследование степени очистки аспирационных выбросов из дробеструйных камер в модельном скруббере

Вентури (с  $d = 0,076$  м) при одном уровне энергозатрат. Затем, используя результаты испытаний в модельном скруббере Вентури, были разработаны, внедрены и исследованы промышленные скрубберы «МКВ-15» на Фастовском заводе химического и нефтяного машиностроения «Красный Октябрь» при очистке аспирационных выбросов из дробеструйных камер.

В табл. 8 приведены результаты испытаний в производственных условиях модельного скруббера Вентури и промышленных установок «МКВ–15», а также расчетов по приведенной выше методике.

Средняя ошибка расчетных величин «проскока» ( $\varepsilon^p$ ) по предлагаемому методу составила для данных таблицы 1,93 %, что вполне удовлетворительно, поскольку не превышает рекомендуемых 15 % [6].

### Выводы

Табл. 8. Результаты исследования эффективности улавливания пыли в модельном и промышленном скрубберах Вентури [3] и расчетов значений « $\varepsilon^p$ »

Тип скруббера	$d$ , м	$V_r$ , м/с	$d_{50}$ , мкм	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ , м	$(\lambda_0/6,73 \cdot 10^{-6})^4$	«Проскок» пыли (100 - $\eta^3$ ), %	«Проскок» пыли, $\varepsilon^p = 0,506 \cdot (\lambda_0/6,73 \cdot 10^{-6})^4$
Модель	0,076	60	12,3	6,73	1	0,506	–
МКВ–15	0,3	60	12,3	9,49	3,95	1,99	2,0
МКВ–15	0,3	52	12,3	10,56	6,07	2,97	3,07

Предложен новый метод расчета эффективности улавливания различных аэрозолей с неизвестными физико-химическими свойствами в скруббере Вентури по результатам его испытаний при одном значении уровня энергозатрат, основанный на использовании определяющего влияния на эффективность улавливания пыли величины внутреннего колмогоровского масштаба турбулентности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вальдберг А.Ю. К расчету эффективности мокрых пылеуловителей // ТОХТ.–1987.–№3.– С. 407-411.

2. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР.–1941.–30.–№4.– С. 299-303.

3. Приемов С.И. Улавливание и рекуперация кормовых и пищевых аэрозолей мокрым коагуляционным методом. // Автореф....докт. техн. наук.– Л.– 1990.– 33 с.

4. Коузов П.А., Мыльников С.И. Сравнительная оценка и рекомендации по унификации мокрых пылеуловителей // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС.–1971, вып.74 – С. 17-23.

5. Мыльников С.И., Мамкин П.П. Исследование коагуляционного мокрого пылеуловителя КМП конструкции «Ленинградский Промстройпроект» // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС.– 1970.– вып.71.– С. 25-30.

6. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности.– Л.: Химия, 1982.– 256 с.

7. Брыляков В.Е., Еценко Л.И., Шагарова Б.А. и др. Оптимизация турбулентных промывателей при обеспыливании тонкодисперсных каолиновых аэрозолей. // Тр. НИПИОТСТРОМ.– 1974.– вып. 8.– С. 38-44.

Получено 27.01.2009 г.