

УДК 618.3.621.395

## К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ВЫХЛОПНОЙ ТРУБЫ В КОРПУС ЦИКЛОНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

**Забулонов Ю.Л., Архипенко О.Н., Рыжов В.И.**

**Забулонов Ю.Л.**, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, проф., зав. отд., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Zabolonov@nas.gov.ua

**Архипенко О.Н.**, м.н.ст., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Archipenko@nas.gov.ua

**Рыжов В.И.**, аспирант Университета «Украина».

*В статье приведены данные экспериментальных исследований, проведенных для обоснования возможности использования нового комплексного параметра золоулавливания, включающего глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона, и создание более точных методов расчета общей эффективности золоулавливания в различных по конструктивному исполнению циклонных аппаратах. Для оценки вида функции пофракционной степени очистки циклонных пыле-золоуловителей « $d_{\eta=50}$ » подтверждена возможность использования предложенного комплексного параметра золоулавливания, включающего глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона « $l_{\text{вых}}$ », коэффициент крутки потока в ядре течения и величину максимального значения тангенциальной скорости потока в кольцевом канале между корпусом и выхлопной трубой циклона. При использовании многочисленных достоверных результатов экспериментальных исследований, аналитических и компьютерных расчетов, разработан более точный метод расчета общей эффективности золоулавливания в различных по конструктивному исполнению циклонных аппаратах. Разработан новый параметр золоулавливания, включающий глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона, коэффициент крутки потока в ядре течения, максимальную тангенциальную скорость в кольцевом канале циклона. Были проведены исследования, целью которых являлось установление количественных зависимостей влияния величины « $l_{\text{вых}}$ » на эффективность золоулавливания и гидравлическое сопротивление циклона. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что, с одной стороны, имеется значительная зависимость эффективности очистки пыли от величины « $l_{\text{вых}}$ » (особенно для мелких фракций пыли – примерно, до 5 мкм), а, с другой стороны то, что оптимальной величиной для « $l_{\text{вых}}$ » можно принять значение, примерно, равное  $(l_{\text{вых}})_{\text{опт}} = 2,5 \dots 3$ , поскольку дальнейшее ее увеличение не приводит к заметному росту эффективности золоулавливания.*

**Ключевые слова:** *закрученные потоки, циклонные пыле-золоуловители, длина выхлопной трубы, эффективность очистки.*

### **Постановка проблемы.**

Циклонные пыле-золоуловители относятся к наиболее распространенным типам инерционного пылеулавливающего оборудования [1, 2] благодаря сравнительно высокой степени очистки от фракций пыли диаметром более 10 мкм, простоте конструкции и высокой

производительности. Поэтому разработка все более точных аналитических методов расчета параметров фракционных степеней очистки циклонных аппаратов является весьма актуальной задачей.

**Объектом наших теоретических и экспериментальных исследований** является обоснование возможности повышения точности аналитических методов расчета параметров фракционных степеней очистки циклонных аппаратов за счет использования величин глубины погружения выхлопной трубы в корпус циклона, коэффициента крутки потока в ядре течения и величины максимального значения тангенциальных скоростей воздуха в кольцевом канале между корпусом и выхлопной трубой циклона.

**Предмет исследований** – циклонное пыле-золоулавливающее оборудование и разработка, для выполнения аналитических расчетов, эффективности очистки нового комплексного параметра золоулавливания на основе использования величин длины выхлопной трубы, коэффициента крутки потока в ядре течения и величины максимального значения тангенциальных скоростей воздуха в кольцевом канале между корпусом и выхлопной трубой циклона.

#### **Цель работы:**

– обоснование возможности использования нового комплексного параметра золоулавливания, включающего глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона, коэффициент крутки потока в ядре течения и величину максимального значения тангенциальной скорости потока в кольцевом канале между корпусом и выхлопной трубой циклона при оценке параметров функции пофракционной степени очистки циклонных пыле-золоуловителей « $d_{\eta=50}$ »;

– создание более точных методов расчета общей эффективности золоулавливания в различных по конструктивному исполнению циклонных аппаратах с использованием наиболее достоверных экспериментальных данных очистки воздуха от пыли в различных конструкциях циклонов.

#### **Теоретические исследования**

На аэродинамическую структуру циклонного потока и его сепарационные свойства оказывает значительное влияние геометрический параметр, характеризующий выходные условия – глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона « $l_{\text{вых}}$ » [1, 2]. Существующие методы аэродинамических и пылевых расчетов циклонов не учитывают влияние « $l_{\text{вых}}$ », хотя оно может быть значительным – по результатам исследований аэродинамики [3] и пылеулавливания [1]. Так, например, недоучет относительной длины

выходного канала в схемах аэродинамического расчета циклонных устройств приводит к ошибкам в определении « $\xi_{\text{вх}}$ » и максимального значения тангенциальной скорости – до 40% и более [3].

Аналогичной количественной оценки влияния величины « $l_{\text{вых}}$ » на эффективность пылеулавливания не имеется, поэтому в настоящей работе выполнены исследования по учету влияния глубины погружения выхлопной трубы в корпус циклона на параметры эффективности золоулавливания. Опыты проведены на модели циклонной камеры, описанной в работе [4], с  $D_{\text{ц}} = 0,2$  м;  $d_{\text{вых}} = 0,1$  м;  $H_{\text{об}} = 4,6$ ;  $a = 0,26$ ;  $b = 0,7$ ;  $H_{\text{ц}} = 2,0$ .

Параметр « $l_{\text{вых}}$ » изменялся от 0 до 3,0. Параметры экспериментальной золы, набранной из бункера электрофильтра Трипольской ТЭС, составляли  $d_{50} = 14$  мкм;  $\sigma = 2,1$   $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup> и приведены в табл. 1; температура воздуха составляла 15 – 20<sup>0</sup>С.

**Таблица 1.** Дисперсный состав экспериментальной золы.

**Table 1.** Disperse composition of experimental ash.

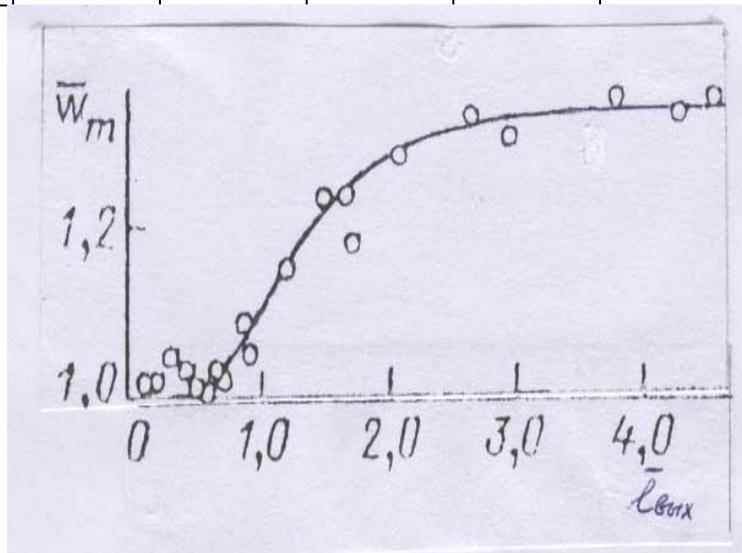
Диаметр частиц, мкм	0–5	5–10	10–20	20–30	30–40	≥ 40
Весовое содержание частиц, %	8,0	25,0	37,0	16,0	6,0	8,0

Результаты измерения полей максимальных значений тангенциальных скоростей (усредненных по нескольким опытам) циклонного потока в кольцевом канале между корпусом циклона и выхлопным патрубком приведены в табл. 2 и на рис. 1.

**Таблица 2.** Значения максимальных значений тангенциальных скоростей воздуха в кольцевом канале циклона.

**Table 2.** The values of the maximum values of the tangential air velocities in the circular channel of the cyclone.

$l_{\text{вых}}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
« $W_m$ »	1,0	1,05	1,14	1,28	1,35	1,379	1,394	1,398



**Рисунок 1.** Зависимость максимальных значений тангенциальных скоростей « $W_m$ » от величины « $l_{\text{вых}}$ ».

**Figure 1.** Dependence of the maximum values of tangential velocities " $W_m$ " from the value of " $l_{\text{out}}$ ".

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 1, показал, что величина « $W_m$ » в кольцевой цилиндрической части циклона может быть рассчитана по зависимости для описания одной из основных аэродинамических характеристик циклонного потока – коэффициента крутки в ядре течения « $\varepsilon_r$ » от параметра « $l_{\text{вых}}$ » [3]:

$$\varepsilon_r = 1 + 0,4 \exp[-8 \exp(-2l_{\text{вых}})], \quad (1)$$

Учитывая прямую пропорциональность величины « $W_m$ » от величины « $\varepsilon_r$ » [3], можно обобщить приведенные в табл. 2 и на рис. 1 данные уравнением:

$$W_m = 1 + 0,4 \exp[-8 \exp(-2l_{\text{вых}})], \quad (2)$$

Из анализа полученных данных видно, что с увеличением глубины погружения выхлопной трубы в корпус циклона до « $l_{\text{вых}}$ » = 3, величина « $W_m$ » возрастает, что должно способствовать и увеличению степени золоулавливания в циклоне. Дальнейшее удлинение выходного патрубка практически не приводит к изменению величины « $W_m$ », то есть, течение в ядре потока в циклонном аппарате становится автомодельным по отношению к глубине погружения выхлопной трубы в корпус циклона « $l_{\text{вых}}$ ».

Кроме этого положительного, с точки зрения увеличения сепарационной способности циклона, факта роста в кольцевой зоне максимальной тангенциальной скорости потока, радиальная скорость пылинки, возникающая в результате воздействия центробежных сил, является ее полной радиальной скоростью [1]. Это также должно способствовать росту степени очистки.

Исследование полей скоростей и концентрации пыли в корпусе циклона позволили нам установить, что, примерно, до 80% пылеуноса составляет вынос пыли именно из кольцевой зоны циклона и только 20% – из конической. Это свидетельствует о том, что повышение степени очистки тесно связано с распределением тангенциальной скорости потока именно в кольцевой зоне между корпусом циклона и выхлопной трубой.

### **Экспериментальные исследования**

Были проведены исследования, целью которых являлось установление количественных зависимостей влияния величины « $l_{\text{вых}}$ » на эффективность золоулавливания и гидравлическое сопротивление циклона. Относительная глубина погружения выхлопной

трубы « $l_{\text{вых}}$ » в опытах составляла: 0; 0,1; 0,2; 0,3; скорость воздуха в горизонтальном сечении циклона составляла: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 м/сек.

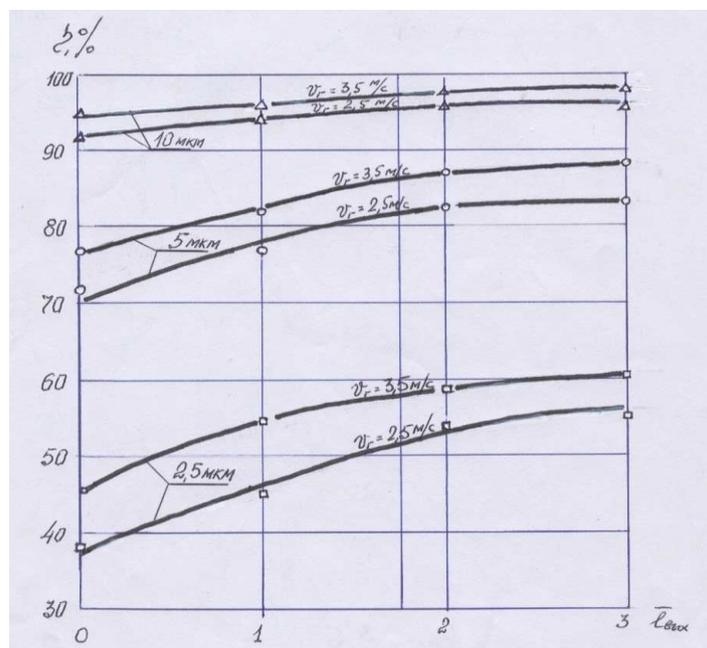
В табл. 3 приведены некоторые пофракционные и общие степени очистки, полученные по результатам исследований о влиянии величины « $l_{\text{вых}}$ » на эффективность очистки.

**Таблица 3.** Значения пофракционных и общих степеней очистки базового циклона в зависимости от величин « $l_{\text{вых}}$ » и « $V_{\text{cp}}$ ».

**Table 3.** The values of the fractional and general degrees of purification of the base cyclone as a function of the values of " $l_{\text{out}}$ " and " $V_{\text{av}}$ ".

$l_{\text{вых}}$	$V_{\text{cp}}, \text{ м/с}$	5	10	15	$\eta_{\text{общ}}, \%$
0	1,5	58	85	94	86,6
0	2	66	89	96	89,2
0	3,5	77	94,5	98,5	96,3
2	1,5	74	92,7	98	92,4
2	2	78	94,3	98,2	94,1
2	3,5	88	97,8	99,4	96,5

Для примера на рис. 2 приведена зависимость пофракционной степени очистки в циклоне частиц диаметром 2,5; 5 и 10 мкм от величины « $l_{\text{вых}}$ » при скорости воздуха 2,5 и 3,5 м/с.



**Рисунок 2.** Зависимость пофракционной степени очистки от « $l_{\text{вых}}$ » и « $V_r$ ».

**Figure 2.** Dependence of the diffraction degree of purification on " $l_{\text{out}}$ " and " $V_g$ ".

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что, с одной стороны, имеется значительная зависимость эффективности очистки пыли от величины « $l_{\text{вых}}$ » (особенно для мелких фракций пыли – примерно, до 5 мкм), а, с другой стороны то, что оптимальной величиной для « $l_{\text{вых}}$ » можно принять значение примерно равное  $(l_{\text{вых}})_{\text{опт}} = 2,5 \dots 3$ , поскольку дальнейшее ее увеличение не приводит к заметному росту эффективности золоулавливания.

В результате математической обработки приведенных выше экспериментальных данных, нами получена следующая зависимость:

$$d_{\eta=50} = 1000 \left[ \Phi_{\text{ex}} \left( \frac{\bar{H}_{\text{об}}}{\bar{D}_e} \frac{w_m}{1.38} \right)^{2/3} \right]^{-1,8} \sqrt{\frac{D_{\text{ц}}^*}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_n^*} \cdot \frac{\mu_{\text{ц}}^*}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{v_{\text{ц}}^*}}, \quad (3)$$

где 1,38 – значение величины « $W_m$ » для « $(l_{\text{вых}})_{\text{опт}} = 2,5$ ».

Действительное значение интегрального параметра закрутки на входе в кольцевой канал « $\Phi_{\text{вх}}$ » определено в работе [3] как среднее по периметру канала во входном сечении и в результате обобщения опытных данных по теплообмену получено в виде:

$$\Phi_{\text{ex}} = 2,83 \left[ \Phi_{\text{жвх}}^2 (1 + \bar{D}_e) \right]^{0,38}, \quad (4)$$

$$\left( \Phi_{\text{жвх}}^2 \right)_m = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1 - \bar{a}}{\bar{a}\bar{b}} \right) - \text{для циклонов с тангенциальным входом [3]}, \quad (5)$$

$$\left( \Phi_{\text{жвх}}^2 \right)_{\text{ту}} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1 + \bar{a}}{\bar{a}\bar{b}} \right) - \text{для циклонов с тангенциально-улиточным входом [3]}, \quad (6)$$

Для проверки возможности описания зависимостью (3) и других циклонов нами были выполнены расчеты по приведенным в разных источниках наиболее известным циклонным аппаратам. Результаты таких оценок представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Сравнение рассчитанных по зависимостям (3) и (4) степеней очистки с экспериментальными данными.**Table 4.** Comparison of the purification rates calculated from dependences (3) and (4) with experimental data.

Тип циклона	$D_{ц,м}$	$a$	$b$	« $l_{ввых}$ »	$d_{50,}$ мкм	$\sigma_{п}$	$\eta^3, \%$	$\eta^{p^*}$	$\eta^{p^{**}}$	Источ ник
ЦН-15	0,45	0,26	0,66	2,44	8	3,5	71,7	71,65	72	[5]
ЦН-15	0,4	0,26	0,66	2,44	8	4	73,5	72,8	73	[6]
ЦН-15	0,4	0,26	0,66	2,44	8	4	75,6	77,6	77,4	[6]
ЦН-11	0,5	0,26	0,48	2,136	8	3,5	73,1	72,3	72,6	[5]
ЦН-24	0,45	0,26	1,11	2,9	8	3,5	66	64	64,9	[5]
ВЦНИИОТ-М	0,6	0,26	0,7	2,2	14	1,85	94,9	95,7	94,9	[7]
МИОТ	0,6	0,26	0,8	1,64	35	4,6	93,7	94,1	93,6	[8]
РИСИ	0,2	0,25	0,5	1,4	14	3,5	88,2	90,9	89,5	[9]
ЛИОТ	0,59	0,27	0,36	2,63	8	3,5	67,7	66,7	66,8	[5]
ВЦНИИОТ	0,37	0,26	1,0	2,2	8	3,5	71,9	72,4	72	[5]
НИИОГАЗ	1,6	0,2	0,4	2,14	13	4,67	81,8	82,2	82	[10]
НИИОГАЗ	0,3	0,2	0,4	2,14	20	2	98,2	98,5	98,4	[6]
Старманда	1,215	0,2	0,5	1	25	5,43	84,2	85,9	83	[11]

\*) ,\*\*) – соответственно расчет по зависимостям (4) и (3) .

Как видно из данных табл. 4, расчет по зависимости (3), учитывающей влияние величины глубины погружения выхлопной трубы в корпус циклона, значительно более точен.

Так, средние значения отношений разности проскоков пыли расчетных и экспериментальных к проскоку экспериментальному, рассчитанному по (4), составило **8%**, а по зависимости (3) – соответственно **5%**, то есть точность расчетов проскока пыли повысилась в 1,6 раза по всем рассмотренным в табл. 4 циклонам.

$$d_{\eta=50} = 1000 \left[ \Phi_{вх} \left( \frac{\bar{H}_{об}}{D_e} \right)^{2/3} \right]^{-1,8} \sqrt{\frac{D_u^*)}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_n^*)} \cdot \frac{\mu_z^*)}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{v_u^*)}}, \quad (4)$$

Это свидетельствует о целесообразности учета величины « $l_{ввых}$ » в расчетах эффективности золоулавливания циклонных аппаратов.

Влияние величины « $l_{\text{вых}}$ » на изменение гидравлического сопротивления циклона исследовалось при разных скоростях воздуха в горизонтальном сечении циклона. Результаты приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Гидравлическое сопротивление циклона (Па) при разных значениях « $l_{\text{вых}}$ » и « $V_{\text{ср}}$ ».

**Table 5.** Hydraulic resistance of the cyclone (Pa) for different values of " $l_{\text{out}}$ " and " $V_{\text{av}}$ ".

$V_{\text{ср}}$ , м/с	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$l_{\text{вых}} = 0$	105	236	420	656	950	1286	1680
$l_{\text{вых}} = 2,5$	110	248	442	689	998	1350	1750

Как видно из данных табл. 5, влияние на сопротивление циклона величины « $l_{\text{вых}}$ » незначительно и составляет, по нашим данным, **не более 5%** от величины суммарного сопротивления циклона. Следует отметить, что эти результаты удовлетворительно коррелируют с данными работы [2], где приведены примерно аналогичные количественные показатели. Более сильное влияние величины « $l_{\text{вых}}$ » на значение гидравлического сопротивления циклона СИОТ (до 30%) в работе А.М. Гервасьева [1] можно объяснить тем, что в циклоне СИОТ выхлопная труба вводилась в коническую часть, поскольку конический циклон СИОТ не имел цилиндрической части.

Использование расчетных экспериментов, наряду с натурными, стало возможным, главным образом, благодаря быстрому развитию методов расчетной гидродинамики и росту возможностей компьютерной техники.

Так, в последние годы успешно развиваются так называемые CFD (Computation Fluid Dynamics) – методы расчетной гидродинамики, основанные на компьютерных технологиях, использовании достаточно точных и эффективных численных алгоритмов, новых математических моделей процессов переноса субстанции.

Ниже рассмотрены результаты применения современных CFD методов расчетной гидродинамики для исследования сложных вероятностных процессов улавливания аэрозолей в циклонах аппаратов.

При этом исследовались закономерности аэродинамики движения запыленного газа в системе «циклон – бункер» типового циклона «ЦН-15» и процесса улавливания частиц пыли при моделировании с помощью лицензионного прикладного пакета программ для численного моделирования турбулентных потоков «Solid Works Flow Simulation 2010» [12]

в Национальном техническом университете Украины «Киевский Политехнический институт».

По данным компьютерного моделирования эффективность улавливания частиц диаметром 4,5 мкм в типовом циклоне «ЦН-15» составила  $\eta = 50\%$ , то есть величина  $d_{\eta=50} = 4,5$  мкм. Такой результат совпал с экспериментальными данными [1].

Ниже приведены результаты компьютерных расчетов степени очистки от пыли в типовом циклоне «ЦН-15» при увеличении высоты выхлопного патрубка.

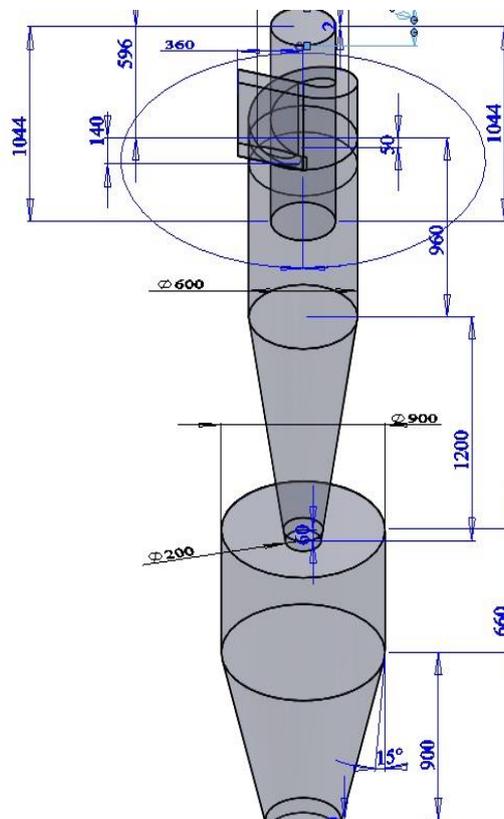
При этом использовались:

– параметры, характеризующие турбулентное течение газового потока (интенсивность турбулентности, внутренний колмогоровский микромасштаб турбулентности, динамическая скорость потока и др.);

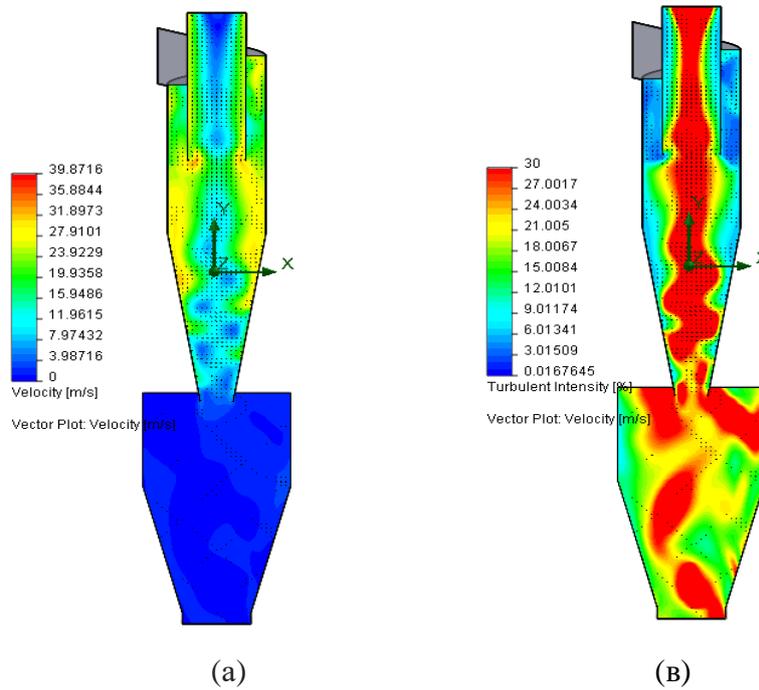
– наиболее надежные экспериментальные данные изменений эффективности очистки пыли в типовых циклонах при различных изменениях их конструктивных параметров.

На рис. 3 приведены размеры принятого при компьютерном моделировании типового циклона «ЦН-15» (диаметром 0,6 м) с бункером.

На рис. 4 приведены распределения скорости и интенсивности турбулентности газового потока типового циклона «ЦН-15» с бункером.



**Рисунок 3.** Размеры типового циклона «ЦН-15» с бункером, принятые при компьютерном моделировании.  
**Figure 3.** Dimensions of a typical cyclone "CN-15" with a bunker, adopted in computer modeling.

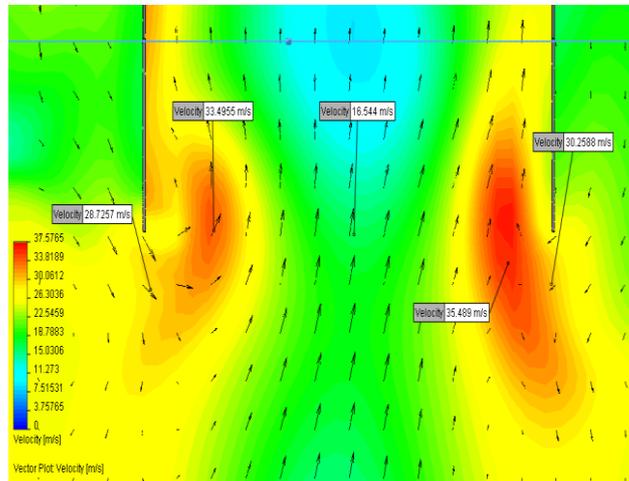


**Рисунок 4.** Распределение скорости (а) и интенсивности турбулентности (в) газового потока типового циклона «ЦН-15» с бункером (эффективность очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 50\%$ ).  
**Figure 4.** Distribution of velocity (a) and intensity of turbulence (in) gas flow of a typical cyclone "CN-15" with a hopper (the efficiency of cleaning from particles with a diameter of 4.5 mkm –  $\eta = 50\%$ ).

На рис. 5 приведены результаты компьютерного моделирования распределения скоростей потока газа в циклоне «ЦН-15» с удлиненным на 0,12 м выхлопным патрубком, то есть с величиной углубленного в корпус циклона выхлопной трубой, равной  $(l_{\text{вых}})_{\text{угл}} = (l_{\text{вых}})_{\text{тип}} \cdot D_{\text{ц}} + 0,12 = 1,44 \cdot 0,6 + 0,12 = 0,98$  м или

$$\left[ \frac{0,984}{0,6} \right] = 1,64 D_{\text{ц}} \text{ или } \left[ \frac{1,64}{0,59} \right] = 2,78 d_{\text{вых}}.$$

Величина  $(l_{\text{вых}})_{\text{угл}} = 1,64 D_{\text{ц}}$  соответствует данным работы [13], в которой рекомендуется оптимальная величина  $(l_{\text{вых}})_{\text{угл}} = (1,6...1,7) D_{\text{ц}}$ . или, что соответствует, например, для циклона «ЦН-15» оптимальной величине  $(l_{\text{вых}})_{\text{угл}} = (2,6... 2,88) d_{\text{вых}}$ .



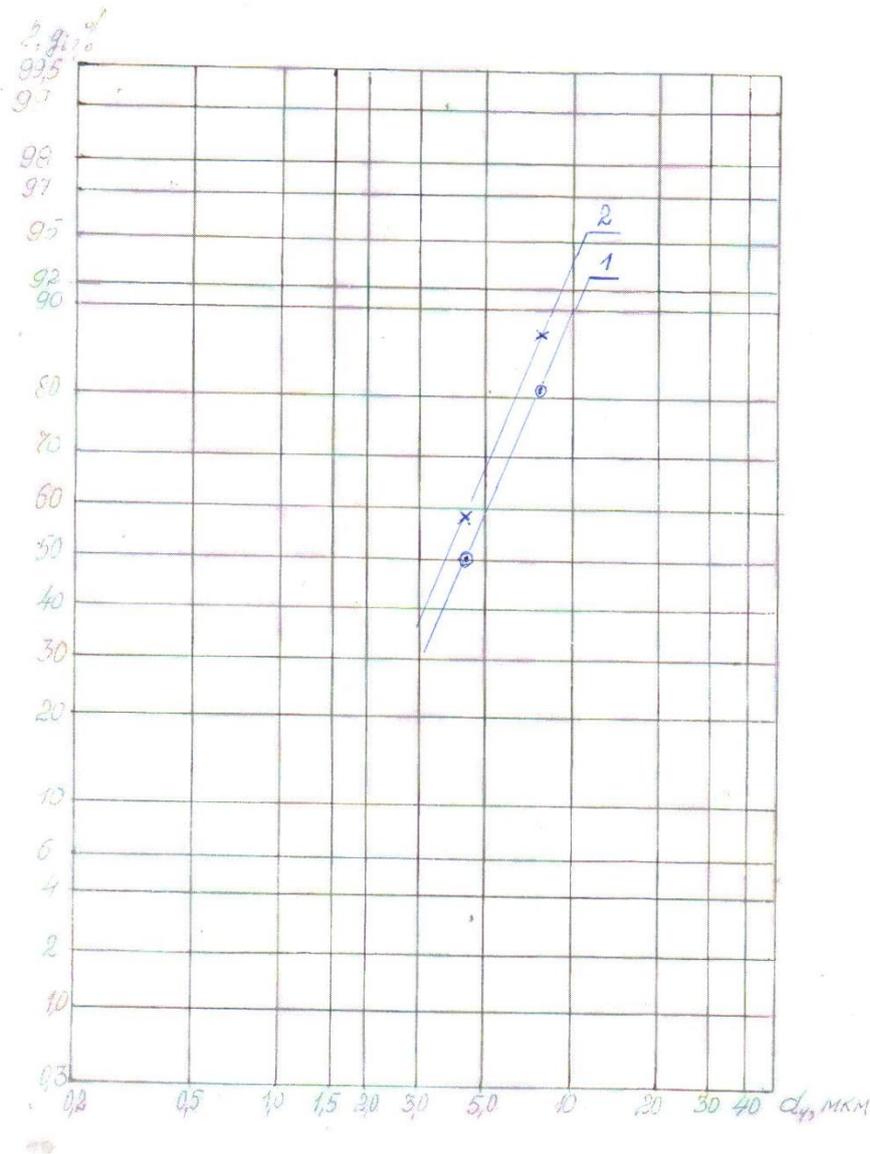
**Рисунок 5.** Распределение скоростей газа в циклоне «ЦН-15» с удлиненной на 120 мм частью выхлопного патрубка – ниже синей линии (эффективность очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 58,1\%$ ).

**Figure 5.** Distribution of gas velocities in the cyclone "CN-15" with an elongated 120 mm part of the exhaust pipe – below the blue line (cleaning efficiency of particles with a diameter of 4.5 mkm –  $\eta = 58.1\%$ ).

На рис. 6 в логарифмической вероятностной координатной сетке приведены пофракционные степени очистки по результатам компьютерного моделирования:

№ 1 – типового циклона (степень очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 50\%$ );

№ 2 – типового циклона с удлиненной на 120 мм выхлопной трубой (степень очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 58,1\%$ ).



**Рисунок 6.** Пофракционные степени очистки: № 1 – типового циклона (степень очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 50\%$ ); № 2 – типового циклона с удлиненной на 120 мм выхлопной трубой (степень очистки от частиц диаметром 4,5 мкм –  $\eta = 58,1\%$ ).

**Figure 6.** The refractory purification rates: No. 1 – a typical cyclone (the degree of purification from particles with a diameter of 4.5 mkm –  $\eta = 50\%$ ); No. 2 – a typical cyclone with an exhaust pipe elongated by 120 mm (the degree of purification from particles with a diameter of 4.5 mkm –  $\eta = 58.1\%$ ).

### Выводы.

Для оценки вида функции пофракционной степени очистки циклонных пыле-золоуловителей « $d_{\eta=50}$ », обоснована возможность использования предложенного комплексного параметра золоулавливания, включающего глубину погружения выхлопной трубы в корпус циклона « $l_{\text{вых}}$ », коэффициент крутки потока в ядре течения и величину максимального значения тангенциальной скорости потока в кольцевом канале между

корпусом и выхлопной трубой циклона. С использованием наиболее достоверных экспериментальных данных, аналитических и компьютерных расчетов разработан более точный метод расчета общей эффективности золоулавливания в различных по конструктивному исполнению циклонных аппаратах.

### **Условные обозначения.**

$\bar{a}, \bar{b}$  – высота и ширина входного канала (по отношению к диаметру циклона);

$D_{\text{ц}}$  – диаметр циклона;

$d_{\text{вых}}$  – диаметр выхлопной трубы;

$d_{50}$  – медианный диаметр пыли, мкм;

$d_{\eta=50}$  – диаметр частиц пыли, улавливаемых с эффективностью 50%, мкм;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости;

$\sigma_{\eta}$  – дисперсия распределения фракционных степеней очистки;

$\Phi_{\text{вх}}$  – действительное значение интегрального параметра закрутки на входе в кольцевой канал;

$\bar{H}_{\text{об}}$  – общая высота циклона (по отношению к диаметру циклона);

$\xi_0$  – коэффициент гидравлического сопротивления циклона;

$\Delta P$  – сопротивление циклона, Па;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ср}}$  – средняя скорость потока в горизонтальном сечении циклона, м/с;

$W_{\text{м}}$  – максимальные значения тангенциальных скоростей воздуха в кольцевом канале циклона, м/с;

$\sigma_{\eta}$  – дисперсия распределения фракционных степеней очистки;

$\sigma_{\text{п}}$  – дисперсия распределения частиц пыли по размерам;

$l_{\text{вых}}$  – глубина погружения выхлопной трубы в корпус циклона, м;

$l_{\text{вх}} = \frac{l_{\text{вых}}}{d_{\text{вых}}}$  – относительная глубина погружения выхлопной трубы в корпус циклона;

$\xi_{\text{вх}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\sigma$  – стандартное отклонение размеров частиц пыли;

$\varepsilon_{\text{г}}$  – коэффициента закрутки потока в ядре течения.

### **Индексы.**

г – газ; об – общий; п – пыль; ц – циклон; экс – эксперимент; р – расчет.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гервасьев А.М. Пылеуловители СИОТ – М., 1954. – 95 с.
2. Разумов И.М. Сычова А.М. Циклонные сепараторы, конструкции и методы их расчета. – М., 1961. – 71 с.
3. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Остаев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах: Под ред. Э.Н. Сабурова. – Л. Изд-во ленингр. университета, 1989. – 276 с.
4. Приемов С.И. Новый метод расчета эффективности пыле- и золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // Экотехнология и ресурсосбережение – 2000. – № 3. – С. 76 – 78.
5. Коузов П.А. Сравнительная оценка эффективности циклонов различных типов // Научн. работы институтов охраны труда ВЦСПС – М.: Профиздат, 1969. – вып. 60. – С. 3 – 13.
6. Вальдберг А.Ю., Кирсанова Н.С. Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей // Хим. и нефт. машиностроение – 1994. – № 9. – С. 26 – 28.

7. Приемов С.И. К расчету эффективности золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26. – № 4. – С. 47 – 52.
8. Самсонов В.Т. Универсальный циклон МИОТ // Водоснабжение и санитарная техника – 1992. – № 4. – С. 17 – 19.
9. Приемов С.И. Сравнительный анализ методов интенсификации улавливания золы в циклонных аппаратах // Экологические и ресурсосбережение – 2001. – № 2. – С. 73 – 76.
10. Дубинская Ф.Е., Пантюхов Н.А., Вальдберг А.Ю. и др. Очистка газов чугунолитейных вагранок // Промышленная энергетика. – 1982. – № 10 – С. 45 – 46
11. Stairmand C.I. The design and performance of modern Gas-cleaning equipment // I. of the institute of fuel – 1956. – р. 58 – 81.
12. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике, bhv, Санкт-Петербург. – 2000. – 1038 с.
13. Прокофичев Н.Н. Стендовые испытания различных конструктивных элементов малогабаритного циклона ЦП-2. // Труды ЦКТИ. – 1973. – № 124. – С. 99 – 104.

## REFERENCES

1. Gervasjev A. (1954), *Pileulovitely CIOT*, Moskow, RU, 95 p.
2. Razumov I., Sychova A. (1961), *Cyklonnie separatory, konstrukcii i metody ih rascheta*, Moskow, RU, 71 p.
3. Saburov E., Karpov S., Ostashev S. (1989), *Teploobmen I aerodynamyka zakruchennogo potoka v cyklonnyh ustroystvah*, Publishing house of the Leningrad University, Leningrad, RU, 276 p.
4. Priemov S. (2000), *Novij metod rascheta effektivnosti pile- i zoloulavlivania i gidravlichesкого soprotivleniya ciklonnyh apparatov*, Ecotechnology and resource saving, № 3, UA, pp. 76 – 78.
5. Kouzov P. (1969), *Sravnitel'naya ocenka effektivnosti ciklonov razlychnih tyfov*, Scientific work of labor protection institutes All-Union Central Council of Trade Unions, Profizdat, vip. 60, Moskow, RU, pp. 3 – 13.
6. Valdberg A., Kyrzanova N. (1994), *Prakticheskaya realizaciya veroyatnostno-energeticheskogo metoda rascheta centrobejnih pileuloviteley*, Chem. and petroleum mechanical engineering, N 9, Moskow, RU, pp. 26 – 28
7. Priemov S. (2004), *K raschetu effektivnosti zoloulavlivania i gidravlichesкого soprotivleniya ciklonnyh apparatov*, Industrial heating engineering, T 26, N 4, Kyiv, UA, pp. 47 – 52.
8. Samsonov V. (1992), *Universalnij ciklon MIOT*, Water Supply and Sanitary Equipment, N4, Moskow, RU, pp. 17-19.
9. Priemov S. (2001), *Sravnitel'nyj analiz metodov intensivizacii ulavlivania zoly v ciklonnyh apparatah*, Ekotechnologii i resursosberezenie, N 2, Kyiv, UA, pp. 73 – 76.
10. Dubinskaya F., Pantuhov N., Valdberg A. (1982), *Ochistka gazov chugunnolytejnih vagranok*, Industrial power engineering, N 10, RU, pp. 45 – 46.
11. Stairmand C.I. (1956), *The design and performance of modern Gas-cleaning equipment*, I. of the institute of fuel, pp. 58 – 81.
12. SolidWorks 2007/2008 (2000), *Kompyuternoe modelirovanie v ingenernoj practice*, bhv, St. Petersburg, RU, 1038 p.
13. Prokofichev N. (1973), *Stendovie ispitania razlychnyh konstruktivnyh elementov malogabarytnogo ciklona CP-2*, Proceedings of CKTI, N 124, Moskow, RU, pp. 99 – 104.

## ЩОДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ ГЛИБИНИ ЗАНУРЕННЯ ВИХЛОПНОЇ ТРУБИ В КОРПУС ЦИКЛОНА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УЛОВЛЮВАННЯ ПИЛУ І ГИДРАВЛІЧНИЙ ОПІР

Забулонов Ю.Л., Архипенко О.М., Рыжов В.И.

Забулонов Ю.Л., д.т.н., чл.-кор. НАН України, проф., Зав. від., ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Zabolonov@nas.gov.ua

Архипенко О.М., м.н.сп., ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Archipenko@nas.gov.ua

Рыжов В.И., аспірант Університету «Україна».

У статті наведені дані експериментальних досліджень, проведених для обґрунтування можливості використання нового комплексного параметра золоулавлювання, що включає глибину занурення вихлопної труби в корпус циклону, і створення більш точних методів розрахунку загальної ефективності золоулавлювання в різних по конструктивному виконанню циклонних апаратах.

Для оцінки виду функції пофракційного ступеня очищення циклонних пило-золоуловителів « $dh = 50$ » підтверджена можливість використання запропонованого комплексного параметра золоулавлювання, що включає глибину занурення вихлопної труби в корпус циклону « $l_{вх}$ », коефіцієнт крутки потоку в ядрі течії і величину максимального значення тангенціальної швидкості потоку в кільцевому каналі між корпусом і вихлопною трубою циклону. При використанні численних достовірних результатів експериментальних досліджень, аналітичних та комп'ютерних розрахунків, розроблений більш точний метод розрахунку загальної ефективності золоулавлювання в різних по конструктивному виконанню циклонних апаратах.

*Розроблено новий параметр золоулавлювання, що включає глибину занурення вихлопної труби в корпус циклону, коефіцієнт крутки потоку в ядрі течії, максимальну тангенціальну швидкість в кільцевому каналі циклону. Були проведені дослідження, метою яких було встановлення кількісних залежностей впливу величини « $l_{out}$ » на ефективність золоулавлювання і гідравлічний опір циклону. Аналіз отриманих експериментальних даних показує, що, з одного боку, є значна залежність ефективності очищення пилу від величини « $l_{out}$ » (особливо для дрібних фракцій пилу - приблизно, до 5 мкм), а, з іншого боку те, що оптимальним розміром для « $l_{out}$ » можна прийняти значення, приблизно, дорівнює  $(l_{out})_{opt} = 2,5 \dots 3$ , оскільки подальше її збільшення не призводить до помітного зростання ефективності золоулавлювання.*

**Ключові слова:** *закручені потоки, циклонні пило-золоуловачі, довжина вихлопної труби, ефективність очищення.*

## **ON ASSESSMENT OF INFLUENCE OF THE DEPTH OF IMMERSION OF THE EXHAUST PIPE INTO THE CYCLONE BODY ON THE EFFICIENCY OF ASH COLLECTION AND HYDRAULIC RESISTANCE**

**Yu. Zabulonov, O. Arkhipenko, V. Ryzhov**

**Yu. Zabulonov**, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member National Academy of Sciences of Ukraine, prof., Head. Dep., State Institution "Institute of Environmental Geochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine", Zabulonov@nas.gov.ua

**O. Arkhipenko**, mn.st., State Institution "Institute of Environmental Geochemistry, National Academy of Sciences of Ukraine", Arkhipenko@nas.gov.ua

**V. Ryzhov**, postgraduate student of the University of Ukraine.

*The article presents data from experimental studies conducted to substantiate the possibility of using a new complex ash collection parameter, including the depth of the exhaust pipe in the cyclone body, and the creation of more accurate methods for calculating the total efficiency of ash collection in cyclone units of various designs.*

*To assess the type of function of the fractional degree of purification of cyclone dust collectors " $dh = 50$ ", the possibility of using the proposed complex ash collection parameter, including the immersion depth of the exhaust pipe into the cyclone body " $l_{out}$ ", the coefficient of flow twist in the flow core and the maximum value of the tangential flow rate in the annular channel between the casing and the cyclone exhaust pipe. With the use of numerous reliable results of experimental studies, analytical and computer calculations, a more accurate method has been developed for calculating the total efficiency of ash collection in various cyclone apparatuses of design.*

*A new ash trapping parameter was developed, including the depth of immersion of the exhaust pipe into the cyclone body, the twist coefficient of flow in the flow core, the maximum tangential velocity in the cyclone circular channel. Investigations were carried out whose purpose was to establish quantitative dependences of the influence of the magnitude of " $l_{out}$ " on the ash collection efficiency and the hydraulic resistance of the cyclone. Analysis of the experimental data obtained shows that, on the one hand, there is a significant dependence of the efficiency of dust cleaning on the value of " $l_{out}$ " (especially for fine dust fractions - up to about 5 microns), and on the other hand, that the optimal value for " $l_{out}$ " It is possible to take a value approximately equal to  $(l_{out})_{opt} = 2,5 \dots 3$ , since its further increase does not lead to a noticeable increase in the efficiency of ash collecting.*

**Key words:** *swirling flows, cyclone dust-ash collectors, length of the exhaust pipe, purification efficiency.*