

# Оценка чувствительности инерционных пылеуловителей к изменениям режима работы

Д. П. Боровков<sup>1</sup>, П. А. Сидякин<sup>2</sup>, Д. В. Щитов<sup>2</sup>,  
Е. О. Черевиченко<sup>3</sup>, В. Ю. Амирян<sup>2</sup>, А. С. Татов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup> Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета

<sup>3</sup> ООО «ВолгоградНИПИморнефть»

E-mail: sidyakin\_74@mail.ru

**Аннотация.** Оценка чувствительности к изменениям аэродинамического режима является важной составляющей в достижении высоких показателей эффективности проектирования, наладки и эксплуатации инерционных пылеуловителей. Наиболее чувствительными к изменению аэродинамических параметров являются инерционные пылеуловители на встречных закрученных потоках. Для решения поставленной задачи предложен способ оценки на основании методов теории нечетких множеств. Получены функция принадлежности и целевая функция, описывающие процесс пылеулавливания.

**Ключевые слова:** пылеуловители на встречных закрученных потоках; пылеулавливание; системы аспирации; оценка чувствительности

## I. ВВЕДЕНИЕ

Пылеуловители на встречных закрученных потоках, являющиеся новым перспективным типом инерционных пылеуловителей, в настоящее время получают все более широкое распространение в системах аспирации промышленных предприятий [1–4]. Данная тенденция обусловлена рядом преимуществ, характерных для пылеулавливающих аппаратов инерционного типа, в основе которых лежит использование вихревого эффекта. Основной особенностью пылеуловителей на встречных закрученных потоках является наличие двух вводов закрученного потока в сепарационную камеру, что позволяет получать более высокую степень интенсивности и равномерности закрутки очищаемого потока (вихревой эффект) [5–7].

Наличие вихревого эффекта позволяет не только повысить общую эффективность сепарации твердых частиц, но и увеличить долю отделенных от газового потока частиц мелких фракций, которые представляют наибольшую опасность для здоровья человека и оказывают наиболее неблагоприятное воздействие на окружающую среду [1, 2, 6–8]. Таким образом, пылеуловители на встречных закрученных потоках (ВЗП), сочетая в себе конструктивную простоту, надежность и низкий уровень капитальных и эксплуатационных затрат, существенно превосходят последние в эффективности. Вышеперечисленные достоинства делают пылеуловители ВЗП надежным, эффективным и экономичным средством решения экологических и гигиенических задач. Однако наличие дополнительного ввода вторичного потока делает пылеуловитель более чувствительным к изменениям аэродинамического режима работы [1, 3, 9].

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Основной проблемой при эксплуатации пылеуловителей ВЗП является изменение соотношения расходов запыленных потоков подаваемых на первичный и вторичный вводы. Конструктивные особенности позволяющие обеспечивать наличие вихревого эффекта в сепарационной камере пылеуловителей ВЗП, заключающиеся в наличии оппозитных закрученных потоков, один из которых направлен снизу непосредственно к выходному патрубку, обуславливают возможность проскока пылевых частиц [1–6]. При увеличении расхода вторичного потока содержащиеся в нем пылевые частицы, не успевают переходить в первичный поток, и вместо попадания в пристенную область течения, где происходит сепарация, попадают в поток очищенного газа. Снижение же расхода вторичного потока приводит к уменьшению интенсивности закрутки очищаемого пылегазового потока в сепарационной камере пылеуловителя, а также к снижению равномерности ее распределения по высоте. Таким образом, пылеуловитель на встречных закрученных потоках по характеристикам начинает приближаться к обычным гидроциклонам, теряя свое основное преимущество. Следует отметить, что оптимальные значения соотношения расходов первичного и вторичного потока может существенно различаться для вихревых пылеуловителей различных типов. На значение данного параметра оказывают влияние различные факторы, основными из которых являются конструктивные параметры пылеуловителя, свойства улавливаемой пыли, и параметры газовой среды [1–6]. Однако, как показывают многочисленные исследования, величина доли очищаемого потока, направляемого на вторичный ввод, обеспечивающая наивысшие значения эффективности очистки является практически постоянной для определенного типа вихревых пылеуловителей [6, 7].

Особенно актуальной задача поддержания оптимального соотношения расходов становится в условиях нестационарных режимов эксплуатации аспирационных систем, характеризующихся ступенчатым режимом изменения расхода очищаемого газа [1, 4, 6–9]. В условиях современного производства все чаще применяются системы автоматического управления работой аспирационных систем, позволяющие более гибко реагировать на изменения технологического режима аспирируемого оборудования. Автоматическое регулирование расхода очищаемого газа наиболее часто применяется в случае, когда

аспирационная система обслуживает несколько единиц технологического оборудования.

При изменении режима работы, либо включении/отключении таких единиц производится автоматическое регулирование расхода. Такие изменения в аэродинамическом режиме аспирационной системы приводят к изменению соотношения расходов первичных и вторичных потоков  $L_n/L$  в вихревых пылеуловителях. Очевидно, что по вышеизложенным причинам, для поддержания эффективной работы пылеуловителей при этом необходимо поддерживать заданный режим работы, характеризующийся оптимальным соотношением  $L_n/L$ . Также очевидно, что наибольшую эффективность регулирования в этом случае обеспечивают автоматические системы.

Для анализа работы пылеуловителей ВЗП в условиях кусочно-стационарного характера изменений общего расхода воздуха, поступающего на очистку, необходимо оценить чувствительность аппаратов к подобным изменениям их режима функционирования.

При классическом подходе чувствительность является качественной оценкой и определяется как функция частоты [10, 11]. С учетом ориентированности традиционных методов анализа чувствительности на частотную область, область их применения ограничена узким интервалом частотных границ. Также применение классических методов затруднено тем, что при их помощи в частотной области, как правило, рассматривается влияние на чувствительность системы лишь одного параметра. Поэтому, для описания чувствительности динамических нелинейных систем, наиболее эффективным является применение методов теории нечетких множеств [10].

Для образования понятия нечеткого множества принято использовать понятие принадлежности, позволяющего расширять двухэлементарное множество, состоящее из значений характеристической функции  $\{0, 1\}$  до континуума  $[0, 1]$  [10, 12]. Данное преобразование позволяет осуществлять плавный переход от полной принадлежности до полной непринадлежности описываемого объекта к определенному классу. Принадлежность элемента множеству при этом выражается определенным числом из интервала  $[0, 1]$ . Описываемое нечеткое множество  $A = \{(x, \mu_A(x))\}$  при этом может быть представлено в виде некоторой совокупности упорядоченных пар, которые, в свою очередь состоят из элементов  $(x)$ , принадлежащих универсальному множеству  $(X)$ , и соответствующих степеней принадлежности  $\mu_A(x)$ , либо при помощи функции  $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$ , ввиду того, что рассматриваемая функция представляет собой исчерпывающую характеристику нечеткого множества [10].

Если рассматривать пылеуловитель как систему, тогда параметры, оказывающие воздействие на работу системы являются входными нечеткими переменными  $x$ . Реакция системы на воздействия представляет собой нечеткую переменную выхода  $y$ .

Нечеткую переменную можно охарактеризовать как тройку:

$$(N, X, A),$$

где:  $N$  – обозначение нечеткой переменной;  $X$  – универсальное множество; нечеткое множество, принадлежащее  $X$ , задающее ограничение.

Для проведения оценки чувствительности функциями принадлежности  $\mu_{x_i}(x_i)$ , необходимо охарактеризовать отклонения величин входных параметров  $x_i$ . Значение нечеткой переменной на выходе  $y(t)$  при этом характеризуется функцией принадлежности  $\mu_y(y, t)$ , которая, в свою очередь, является функцией времени.

На рис. 1. показана функция принадлежности входной нечеткой переменной  $L_n/L$  (отношение расхода воздуха, поступающего на нижний ввод вихревого аппарата к общему количеству воздуха, поступающего на очистку). Функция принадлежности на входе математически выражается следующим образом:

$$\mu(L_n/L) = \begin{cases} 1 - [(L_n/L - (L_n/L)^*)/F]^\beta, & \text{при } L_n/L \geq (L_n/L)^*; \\ 1 - [(L_n/L)^* - L_n/L]/E]^\beta, & \text{при } (L_n/L)^* \leq L_n/L; \\ 0, & \text{при } L_n/L > (L_n/L)^* + F. \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\beta=0,3$  – параметр переменной;  $(L_n/L)^*$  – величина, характеризующая идеальное значение нечеткой переменной  $L_n/L$ ;  $E=0,41$ ;  $F=0,17$  – константы, характеризующие область изменения значений нечеткой переменной.

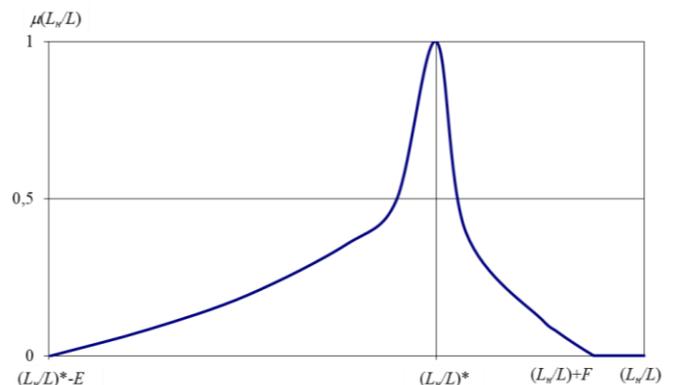


Рис. 1. Функция принадлежности нечеткой переменной  $L_n/L$  (отношение расхода воздуха, поступающего на нижний ввод вихревого аппарата к общему количеству воздуха, поступающего на очистку)

Выходной нечеткой переменной, представляющей собой в данном случае целевую функцию, является эффективность  $\eta$ , описываемая функцией принадлежности  $\mu(\eta)$ , представленной в графическом виде на рис. 2. Выражение функции  $\mu(\eta)$  имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ при } \eta \leq (\eta^* - D); \\ \frac{2(\eta - (\eta^* - D))^2}{(\eta^* - (\eta^* - D))^2} \text{ при } 0,85 < \eta \leq \frac{(\eta^* + (\eta^* - D))}{2}; \\ 1 - \frac{2(\eta - (\eta^* - D))^2}{(\eta^* - (\eta^* - D))^2} \text{ при } \frac{(\eta^* + (\eta^* - D))}{2} < \eta < \eta^*; \\ 1, \text{ при } \eta \geq \eta^*. \end{array} \right. \quad (2)$$

где:  $\eta^*$  – идеальное значение нечеткой переменной  $\eta$ ;  $D=0,15$  – константа задающая границу изменения нечеткой переменной.

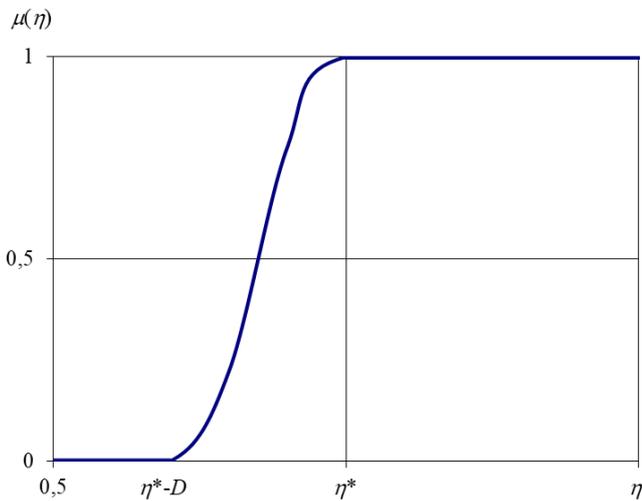


Рис. 2. Функция принадлежности нечеткой переменной  $\eta$  (эффективность очистки в вихревом аппарате)

Нечеткая чувствительность целевой функции  $\eta$  относительно нечеткого параметра  $L_n/L$  определяется уравнением

$$S_{(L_n/L)}^\eta = \frac{1 - \mu(\eta)}{1 - \mu(L_n/L)}, \quad (3)$$

где:  $\mu(\eta)$  – функция принадлежности нечеткой выходной переменной  $\eta$ ;  $\mu(L_n/L)$  – функция принадлежности нечеткой входной переменной  $L_n/L$ .

Величина  $\mu(\eta)$  позволяет произвести оценку величины отклонения от «желаемого» либо «нормального» значения. Минимальное значение  $S_{(L_n/L)}^\eta$  принимает в случае, когда  $\mu(\eta)=1$ .

Таким образом, применение методов теории нечетких множеств позволяет описать влияние изменение аэродинамических параметров на эффективность пылеуловителей ВЗП, для осуществления управления в автоматическом режиме.

### III. Выводы

1. Пылеуловитель на встречных закрученных потоках, отличаются повышенной эффективностью, сочетая ее конструктивной простотой и эксплуатационной надежностью.
2. Пылеуловители на встречных закрученных потоках отличаются повышенной чувствительностью к изменению аэродинамического режима работы, за счет наличия двух вводов запыленного потока.
3. Чувствительность пылеуловителей на встречных закрученных потоках к изменению аэродинамического режима может быть описана при помощи теории нечетких множеств.
4. Для пылеуловителей ВЗП функция принадлежности входной нечеткой переменной

охарактеризована величиной отношения расходов воздуха, поступающего на нижний ввод вихревого аппарата к общему количеству воздуха, поступающего на очистку.

5. Выходной нечеткой переменной, представляющей собой в данном случае целевую функцию, является эффективность пылеулавливания.
6. В ходе исследований получены выражения, характеризующие функцию принадлежности и целевую функцию.
7. Применение методов теории нечетких множеств позволяет описать влияние изменение аэродинамических параметров на эффективность пылеуловителей ВЗП, для осуществления управления в автоматическом режиме.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Azarov V.N., Lukanin D.V., Borovkov D.P., Redhwan A.M. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows // International Review of Mechanical Engineering. 2014. V. 8. № 5. P. 851-856.
- [2] Азаров В.Н., Боровков Д.П. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии. // Строительные материалы. 2012. № 5. С. 65-67.
- [3] Сидякин П.А., Эмба С.И., Семенова Е.А., Боровков Д.П., Маринин Н.А. Совершенствование систем обеспыливания на предприятиях деревообрабатывающей отрасли. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 11 (133). С. 67-70.
- [4] Азаров В.Н., Боровков Д.П. Об использовании закрутки потока в аспирационных системах на предприятиях строительной индустрии. // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2012. № 16. С. 12-17.
- [5] Боровков Д.П., Сидякин П.А., Бурба И.В., Эмба С.И. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками. // Фундаментальные исследования. 2013. № 11-5. С. 866-870.
- [6] Боровков Д.П., Бурба И.В., Чичиров К.О. Повышение эффективности пылеуловителей на встречных закрученных потоках. // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 157-163.
- [7] Azarov V.N., Stefanenko I.V., Borovkov D.P., Ostaali M. Optimization of design parameters of dust collectors with counter-current swirling flows in the systems of dedusting ventilation // International Review of Mechanical Engineering. 2018. V. 12. № 8. P. 721-725.
- [8] Бурба И.В., Боровков Д.П., Азаров Д.В. Экспериментальные исследования по оптимизации конструктивных параметров верхнего ввода пылеуловителя на встречных закрученных потоках. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 32 (51). С. 194-199.
- [9] Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. 405 с.
- [10] Заде Л.А. Понятия лингвистической переменной и его применение к понятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- [11] Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
- [12] Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.