

К решению проблемы управления работой вихревого пылеуловителя в кусочно-стационарном режиме

Д. П. Боровков¹, П. А. Сидякин², Д. В. Щитов²,
Е. О. Черевиченко³, В. Ю. Амирян², А. С. Татов²

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета

³ ООО «Волгограднефтепроект»

E-mail: sidyakin_74@mail.ru

Аннотация. Проблема управления работой вихревых пылеуловителей является важной составляющей в достижении высоких показателей эффективности проектирования, наладки и эксплуатации инженерно-экологических систем. Эффективность работы вихревых пылеуловителей сильно зависит от аэродинамических параметров. Для решения поставленной задачи предложен способ оценки на основании методов теории нечетких множеств.

Ключевые слова: пылеуловители на встречных закрученных потоках; пылеулавливание; системы аспирации; проблемы управления

I. ВВЕДЕНИЕ

Вихревые пылеуловители представляют собой относительно новый тип инерционного пылеулавливающего оборудования, являющегося дальнейшим развитием пылеуловителей циклонно-центробежного типа. Унаследовав от циклонных пылеуловителей основной принцип – центробежную сепарацию, вихревые пылеуловители унаследовали и их основные преимущества, основными из которых являются конструктивная простота, высокая энергоэффективность (малое гидравлическое сопротивление), надежность и долговечность. При этом вихревые пылеуловители, за счет конструктивных отличий, существенно превосходят аппараты циклонного типа в эффективности очистки [1–6]. Данное преимущество особенно ярко выражено при очистке выбросов, в которых велика доля пылевых частиц размером менее 50 мкм [3, 5–8]. Данное обстоятельство особенно важно т.к. именно мелкодисперсная пыль оказывает наиболее существенное негативное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека. Таким образом, вихревые пылеуловители являются весьма перспективным техническим решением, позволяющим повысить эффективность работы инженерно-экологических систем, не требующим существенных капитальных вложений и эксплуатационных расходов [1, 2, 4, 9].

Основным признаком, конструктивно отличающим вихревые пылеуловители от циклонов классической конструкции, является наличие дополнительного (вторичного) ввода закрученного очищаемого потока в сепарационную камеру [1–4]. За счет этого достигается более равномерное распределение интенсивности закрутки потока по высоте сепарационного объема, позволяющее получать большие, в сравнении с циклонами, значения интенсивности закрутки

очищаемого пылегазового потока, без существенного повышения величины гидравлического сопротивления [1–4, 7, 9]. В этом заключается суть вихревого эффекта, достигаемого вследствие слияния двух встречнонаправленных закрученных потоков.

Однако, широкое внедрение вихревых пылеуловителей в промышленные системы очистки пылевых выбросов сдерживается рядом проблем, связанных с необходимостью управления их аэродинамическим режимом, обусловленной более высокой сложностью конструкции в сравнении с пылеуловителями циклонного типа [3, 5–9].

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главным фактором, оказывающим влияние на эффективность сепарации пылевых частиц в вихревых пылеуловителях, является количество запыленного газа, поступающего в сепарационный объем через патрубок вторичного ввода [3, 7, 8]. Данная величина характеризуется безразмерным отношением объемного расхода подаваемого на вторичный ввод к общему, поступающему на очистку в пылеуловитель L_2/L_o . В силу конструктивных особенностей компоновки сепарационной камеры вихревых пылеуловителей, вторичный закрученный поток движется навстречу первичному, т.е. направлен на патрубок очищенного газа. В силу этого, параметры вторичного потока должны быть подобраны таким образом, чтобы пылевые частицы из него успевали переместиться в пристенную область течения, раньше попадания их в зону всасывания выходного патрубка [3, 7, 8]. Очевидно, что выполнения данного условия зависит от соотношения целого ряда факторов, основными из которых будут являться физические свойства пылевой частицы, а также аэродинамические параметры течения внутри сепарационного объема вихревого пылеуловителя. Ввиду сложностей, связанных с аналитическим описанием процесса аэродинамической сепарации [2, 8], для определения значения величины L_2/L_o используют экспериментальные данные, получаемые для определенных типов пылевых частиц [3, 7–10]. Однако обобщая данные, содержащиеся в результатах многочисленных исследований, можно сделать вывод о том, что значения величины L_2/L_o , при которых достигается наилучшие значения эффективности сепарации, для определенного типа вихревых пылеуловителей лежат в довольно узких пределах [3, 7–10]. Данный факт позволяет свести задачу управления аэродинамическим режимом к поддержанию установленных значений величины L_2/L_o .

Особенно актуальной задача управления аэродинамическим режимом становится в условиях нестационарных режимов эксплуатации аспирационных систем, характеризующихся кусочно-стационарным режимом изменения расхода очищаемого газа, характерным для случая, при котором аспирационная система обслуживает несколько единиц технологического оборудования [3].

Процесс управления аэродинамическим режимом вихревого пылеуловителя, как отмечалось выше, заключается в поддержании аэродинамического режима, при котором эффективность сепарации достигает требуемых значений. В качестве регулируемого параметра при этом выступает расход очищаемого газа, подаваемый на вторичный ввод пылеуловителя L_2 . Регулирование осуществляется посредством применения управляемого регулятора расхода воздуха дроссельного типа. Для оценки эффективности сепарации система очистки снабжается датчиками концентрации пыли, расположенными вблизи входного и выходного сечений аппарата. Схема системы приведена на рис. 1.

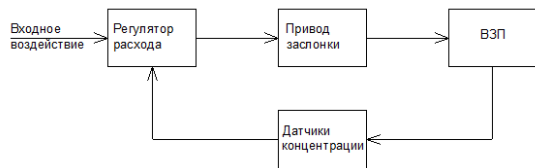


Рис. 1. Схема системы управления работой вихревого пылеуловителя

Однако, в виду того, что величина эффективности сепарации является функцией многих стохастических факторов (температуры и влажности газов, фракционного состава пылевых частиц, некоторых параметров технологического процесса, и т.д.), важной задачей в процессе управления работой пылеуловителя является оценка достигнутого значения. Одно и тоже значение величины эффективности сепарации может являться как весьма высоким, так и совершенно неудовлетворительным, в зависимости от исходных данных.

Обобщение данных [3–8] позволяет дать следующее лингвистическое описание требуемого поведения рассматриваемого пылеуловителя: «эффективность сепарации η достигает максимума при значении величины L_2/L_0 близкому к 0,385». Выражения «эффективность сепарации η достигает максимума» и «значении величины L_2/L_0 близкое к 0,386» представляют собой суждения о входе и выходе объекта. Принудительное изменение значения величины L_2/L_0 при этом будет являться управляющим воздействием. Принятые выражения позволяют производить анализ поведения системы в результате осуществления управляющих воздействий в форме нечетких множеств, определяемых на универсальных множествах «эффективность сепарации η » и «отношением объемного расхода подаваемого на вторичный ввод к общему, поступающему на очистку в пылеуловитель L_2/L_0 ».

Для описания процесса сепарации пылевых частиц вихревыми пылеуловителями использовано понятие нечетких и лингвистических переменных [11]. Нечеткая переменная, определена как нечеткое множество A на множестве действительных чисел R с функцией принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$. При этом нечеткое число « L_2/L_0 близкое к 0,386» определено как нечеткое множество с функцией принадлежности $(L_2/L_0) \in R$ (рис. 2):

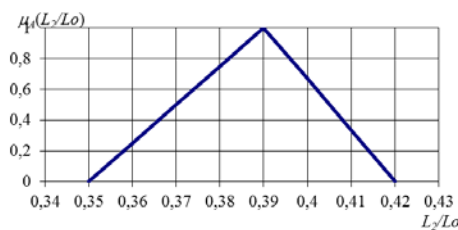


Рис. 2. Функция принадлежности для термина « L_2/L_0 близко к 0,39»

$$\begin{cases} 0 \text{ при } L_2/L_0 \leq 0,35 \\ ((L_2/L_0) - 0,35)/(0,39 - 0,34) \text{ при } 0,34 < L_2/L_0 < 0,39 \\ (0,42 - L_2/L_0)/(0,42 - 0,39) \text{ при } 0,39 < L_2/L_0 < 0,42 \\ 1 \text{ при } L_2/L_0 > 0,42 \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с (1) носителем нечеткого множества « L_2/L_0 близко к 0,39» выступает интервал значений 0,35...0,42. Именно в этом интервале значений величины L_2/L_0 эффективность сепарации характеризуется хорошими значениями.

Для формализации описания изменения величины эффективности сепарации используется лингвистическая переменная (N, T, X, G, M) , где: N – эффективность сепарации; T – {«плохая эффективность», «средняя эффективность», «хорошая эффективность»}; X – $[0, 1]$; G – процедура образования новых термов с помощью связок «и», «или» и модификаторов типа «очень», «не» и др. Например: «средняя или хорошая эффективность», «очень хорошая эффективность» и др.; M – процедура задания на $X=[0, 1]$ нечетких подмножеств A_1 =«плохая эффективность», A_2 =«средняя эффективность», A_3 =«хорошая эффективность», а также нечетких множеств для термов из $G(T)$ в соответствии с правилами трансляции нечетких связок и модификаторов «и», «или», «не», «очень» и др.

Для описания множества «хорошая эффективность» использована функция принадлежности (рис. 3):

$$\begin{cases} 0 \text{ при } \eta \leq 0,85 \\ (2\eta - 0,85)^2/(0,9 - 0,85)^2 \text{ при } 0,85 < \eta < (0,9 + 0,85)/2 \\ 1 - 2(0,9 - \eta)^2/(0,9 - 0,85)^2 \text{ при } (0,9 + 0,85)/2 < \eta < 0,9 \\ 1 \text{ при } \eta > 0,9 \end{cases} \quad (2)$$

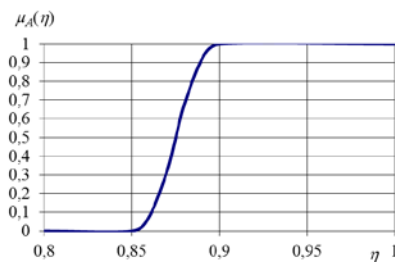


Рис. 3. Функция принадлежности для термина «хорошая эффективность сепарации»

Взаимосвязь параметров L_2/L_0 и η , с учетом имеющихся эмпирических наблюдений можно сформулировать следующим образом:

- при значении отношения расходов L_2/L_0 близком к 0,39 достигается «очень хорошая» эффективность сепарации;
- при небольшом отклонении значения L_2/L_0 от 0,39 достигается «хорошая» эффективность сепарации;
- при большом отклонении значения L_2/L_0 от 0,39 эффективность сепарации становится «плохой».

Приведенное описание процесса оценки эффективности сепарации пылевых частиц в вихревом пылеуловителе представляет собой систему причинно-следственных отношений [11–13]. При этом, фраза «если величина L_2/L_0 достигает значения X , то эффективность сепарации η принимает наибольшее значение» представляет собой неопределенное высказывание вида «если A , то получаем B », в общем виде описывающее отношения нечетких переменных [8]. Фразы такого вида, могут быть классифицированы как нечеткие отношения R на декартовом произведении множеств (X и Y), описываемые функцией:

$$R: X \times Y \rightarrow L \quad (3)$$

L при этом, является частично упорядоченным множеством, всякое непустое подмножество которого имеет минимальную верхнюю, и максимальную нижнюю границы. К такому множеству применимы операции объединения и пересечения, удовлетворяющие законам дистрибутивности [11, 14]. Если множество L может быть описано отрезком, лежащим на вещественной прямой, (3) может быть представлена в виде:

$$\mu_R = X \times Y \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

Для случая, при котором оба множества, входящих в произведение являются конечными, отношение R может быть представлено в матричном виде. Образующие соответствующую матрицу столбцы и строки устанавливаются в соответствии с элементами множеств X и Y . При этом, элемент $\mu_R(x, y)$ размещается в местах пересечения строки x и столбца y .

Ввиду того, что оба нечетких множества (L_2/L_0 и η) представляют собой конечные множества вещественных чисел, операции определения наименьшей верхней и наибольшей нижней граней также определяют операции над нечетким отношением между самими множествами [11]. Полученная матрица отношений представлена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. МАТРИЦА ОТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НЕЧЕТКИМИ МНОЖЕСТВАМИ « L_2/L_0 БЛИЗКО К 0,39» И «ХОРОШАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ»

R	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9
0,35	0	0	0	0	0	0
0,36	0	0,1	0,23	0,23	0,23	0,23
0,37	0	0,1	0,3	0,5	0,5	0,5
0,38	0	0,1	0,3	0,7	0,73	0,73
0,39	0	0,1	0,3	0,7	0,9	1
0,4	0	0,1	0,3	0,68	0,68	0,68
0,41	0	0,1	0,3	0,3	0,32	0,32
0,42	0	0	0	0	0	0

Полученная матрица отношений может быть использована при выборе аэродинамического режима работы вихревого пылеуловителя, обеспечивающего наиболее эффективную сепарацию пылевых частиц, а также при оценке данной величины в условиях отклонений от наиболее выгодного аэродинамического режима. Таким образом, применение методов теории нечетких множеств позволяет описать влияние изменения аэродинамических параметров на эффективность вихревых пылеуловителей, для осуществления автоматического управления в кусочно-стационарном режиме.

III. Выводы

- Эффективность сепарации пылевых частиц вихревыми пылеуловителями зависит от доли расхода очищаемого газопылевого потока, подаваемого на вторичный ввод пылеуловителя.

- Наиболее остро задача регулирования параметров аэродинамического режима вихревого пылеуловителя стоит в условиях кусочно-стационарного изменения расхода очищаемого газа.
- Для описания процесса сепарации пылевых частиц вихревыми пылеуловителями использовано понятие нечетких и лингвистических переменных, которые, могут быть классифицированы как нечеткие отношения на декартовом произведении множеств.
- В виду того, что полученные множества, входящие в нечеткие отношения являются конечными множествами вещественных чисел, их отношение было представлено в виде матрицы отношений.
- Полученная матрица отношений может быть использована при выборе аэродинамического режима работы вихревого пылеуловителя, обеспечивающего наиболее эффективную сепарацию пылевых частиц, а также при оценке данной величины в условиях отклонений от наиболее выгодного аэродинамического режима.
- Применение методов теории нечетких множеств позволяет описать влияние изменение аэродинамических параметров на эффективность вихревых пылеуловителей, для осуществления автоматического управления в кусочно-стационарном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азаров В.Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2003. N8. С.14-15.
- Азаров В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения: Монография. Волгоград: РИК «Политехник» ВолгГТУ, 2003. 136 с.
- Borovkov D.P., Cherevichenko E.O., Sidiyakin P.A., Amiryan V.Yu., Shchitov D.V., Tatov A.S. Evaluation of the sensitivity of inertial dust collectors to changes in operating mode // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems. С. 35-37. DOI:10.1109/CTS59431.2023.10288927
- Азаров В.Н., Боровков Д.П. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии // Строительные материалы. 2012. № 5. С. 65-67.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. T. 12. № 8. С.721-725.
- Бурба И.В., Боровков Д.П., Азаров Д.В. Экспериментальные исследования по оптимизации конструктивных параметров верхнего ввода пылеуловителей на встречных закрученных потоках. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 32 (51). С. 194-199.
- Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. М.: Радио и связь, 1986. 405 с.
- Заде Л.А. Понятия лингвистической переменной и его применение к понятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- Котман А. Введение в теорию нечетких множеств / Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
- Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.