

УДК 621.928.37: 65.011.46

*Р.В. Галич, А.Р. Якуба, В.И. Склабинский, В.Я. Стороженко*

## ВЛИЯНИЕ РАСКРУЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ГИДРОДИНАМИКУ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Сумской государственный университет

Приведена общая оценка характера влияния раскручивающих устройств в выходном патрубке вихревого пылеуловителя со встречными закрученными потоками на эффективность его работы.

При разработке новых или реконструкции действующих пылеулавливающих установок, предназначенных для решения экологических проблем, а также при проектировании специальных технологических систем для реализации отличных от пылегазоочистки процессов химической технологии с использованием многофункциональных вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками (ВАВЗП), знание уровня потерь давления и факторов, влияющих на их энерозатраты, является необходимым условием для определения величины потребляемой энергии и возможности её снижения путём организации гидродинамики с номинальными параметрами.

Кроме того, объективная оценка характера и эффективности параметров проектируемого гидродинамического режима, проводимая на стадии предпроектной проработки, позволит реализовать в вихревом аппарате тот или иной технологический процесс, например процесс центробежной сепарации частиц, в условиях, обеспечивающих достигаемые в разрабатываемой конструкции аппарата технико-экономические показатели.

Выходной патрубком вихревого аппарата модели ВАВЗПЦ (Ц – с цилиндрической сепарационной камерой), является одним из наиболее важных конструктивных элементов и предназначен для отвода очищенного потока за пределы аппарата.

Установлено [1,2], что характер и параметры очищенного потока в выходном патрубке вихревого аппарата модели ВАВЗПЦ (поле скоростей, соотношение тангенциальной, аксиальной и радиальной составляющих, гидравлическое сопротивление), являются функцией гидродинамического режима, организованного в сепарационной камере. Изменение параметров последнего влечёт за собой и соответствующие

изменения в гидродинамике выходного патрубка. В связи с этим, изучение влияния режимно-конструктивных параметров выходного патрубка на эффективность пылеулавливания и энергетические потери является актуальной задачей.

Энергетическая характеристика центробежных, в том числе и вихревых пылеуловителей, выражается гидравлическими потерями в них, обусловленными многими причинами [3], к наиболее существенным из которых относятся:

- потери давления на входе в выходной патрубок и в его проточной части вследствие трения;

- рекуперация энергии вращающегося потока в выходном патрубке аппарата.

Считается [4], что потеря газом кинетической энергии в рабочей зоне центробежных пылеуловителей настолько превышает потери от всех других причин, что только этот вид потерь и следует учитывать. В многочисленных публикациях, посвящённых выявлению причин появления гидравлических потерь в циклонах и вихревых аппаратах, приводятся весьма противоречивые данные, требующие уточнения и экспериментальной проверки. Кроме того, условия, в которых определялись эти параметры, а также геометрия испытанных моделей пылеуловителей, как правило, неизвестны.

Так, например, в зависимости от планируемой схемы работы пылеуловителей в системе воздухопроводов (работа «в сети» или «на выхлоп»), можно ожидать и разные по величине уровни энергетических потерь. Установлено, что при работе «в сети» (групповая компоновка или одиночный аппарат, устанавливаемый на всасывающей стороне вентилятора), к потерям давления в его рабочей части добавляются практически невосполнимые потери, связанные с раскручиванием вращающегося потока и его стабилизацией за пределами выходного патрубка.

При работе пылеуловителя «на выхлоп», при интенсивном вращении отводимого потока безвозвратно утраченной становится вся кинетическая энергия вращающегося потока, причём её величина значительно больше энергии, теряемой в прямом выходном участке при раскручивании потока, примерно на величину скоростного напора (давления), взятого по средней условной скорости потока в выходном патрубке [4].

На практике с целью снижения потерь энергии в ВАВЗПЦ применяют различные по конструкции устройства стабилизации отводимого через выходной патрубок очищенного потока.

На рис. 1 схематично показаны наиболее известные в технике пылеулавливания конструктивные варианты раскручивающих устройств, используемые для стабилизации потоков в выходных патрубках циклонных аппаратов [5]. Эффективность действия этих устройств была опробована на некоторых типоразмерах ВАВЗПЦ как в лабораторных условиях при искусственном запылении потоков, так и в условиях действующих производств. Следует отметить, что аппараты работали на разных гидродинамических режимах при улавливании различных по природе и дисперсному составу пылей. Поэтому результаты этих испытаний не сопоставимы и не заслуживают должного доверия.

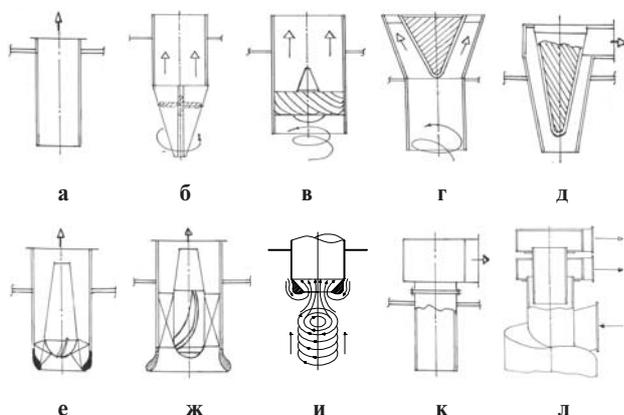


Рис. 1. Конструктивные варианты раскручивающих устройств: а – без раскручивателя; б – конический лопастной; в – винтолопастной; г, д – кольцевой диффузор; е, ж – «розовочный»; и – каплевидный на торце; к – типа «улитка»; л – двойной «улиточный»

Лабораторные исследования с применением двух типоразмеров ВАВЗПЦ (100 и 150 мм) дали следующие результаты.

В проточной части цилиндрического выходного патрубка без раскручивающих устройств (рис. 1,а) при осевом перемещении закрученного потока снижение интенсивности вращения происходит только вследствие трения о стенки, а полная его стабилизация заканчивается на длине от 15 до 50 калибров отводного канала в за-

висимости от режима движения в проточной части выходного патрубка [1]. Такая протяжённость отводящего коллектора в производственных условиях недопустима, поэтому на практике применяют раскручивающие устройства.

Конический крестообразный двухлопастной раскручиватель (рис. 1,б), установленный ниже торца выходного патрубка, за малый промежуток времени практически полностью устраняет вращение потока сразу же за пределами выходного патрубка. При этом практически вся кинетическая энергия вращающегося потока при его раскручивании преобразуется в энергию давления, что, как было установлено, равнозначно увеличению гидравлических потерь от уменьшения диаметра выходного патрубка на 10–15%. Снижение общего гидравлического сопротивления (3–5%) наблюдалось в ВАВЗПЦ-150 (с диаметром сепарационной камеры 150 мм) только при минимальных значениях расхода воздуха (при  $\omega_a=3,5$  м/с) и кратности соотношения потоков ( $K=0,65$ ) по входным каналам. С ростом пропускной способности (вплоть до  $\omega_a=8,85$  м/с) и с увеличением соотношения подаваемых потоков до  $K=0,8$  наблюдался непропорциональный рост энергозатрат на пылеулавливание в среднем на 8,5%.

Наличие винтолопастного раскручивателя (рис. 1,в) в проточной части выходного патрубка, особенно в его вначале, приводило к резкому торможению и раскручиванию восходящего потока при высокоскоростном столкновении с неподвижными профилированными лопастями. При этом энергия вращения потока практически мгновенно трансформировалась в энергию давления, что приводило к резкому росту сопротивления.

Следует отметить, что завихрители винтолопастного типа, в зависимости от количества отклоняющих лопастей и угла «атаки» (угла наклона лопасти по отношению к направлению набегающего потока), обеспечивают различную интенсивность вращения [5]. При использовании их для раскручивания вращающихся потоков установлено, что их стабилизирующая эффективность проявляется лишь на малых расходах при низких величинах кратности потоков. При средних и высоких значениях кратности такая конструкция отрицательно влияет на гидродинамику и приводит к росту энергозатрат.

Раскручиватель в виде кольцевого прямого диффузора, устанавливаемого непосредственно за выходным цилиндрическим патрубком (рис. 1,г), либо внутри конического патрубка (рис. 1,д) с изменением направления отводимого потока, позволяет плавно и практически полностью устранить ротацию потока перед его выходом в свободное пространство, и таким образом уменьшить гидравлические по-

тери за пределами аппарата. Такой способ снижения сопротивления рекомендуется для установок группового исполнения при работе на общую выходную камеру хвостового коллектора. При использовании таких устройств эффективность пылеулавливания практически не меняется при относительно небольшом росте гидравлических потерь в групповом пылеулавливающем агрегате. Аналогичные раскручивающие устройства широко используют также и в батарейных пылеулавливающих установках сухой очистки, в которых через выходной патрубок каждого из элементов очищенный поток отводится в свободное пространство.

Раскручиватели типа «розетка» (рис. 1,е и 1,ж) относятся к конструкциям с безударным входом, в которых раскручивание потока осуществляется в профилированном лопаточном завихрителе, а его стабилизация проходит в кольцевом зазоре. Характерной особенностью таких конструкций является наличие на нижнем торце выходного патрубка обтекателя в форме «капли», способствующего плавному входу отводимого потока в проточную часть, а также инерционному вытеснению частиц пыли из вторичного потока в радиальном направлении в сторону стенки корпуса. На уровне нижнего торца выходной патрубков может иметь как уменьшенный диаметр (рис. 1,е), так и увеличенное проходное сечение (рис. 1,ж), что способствует лишь вытеснению частиц пыли от оси патрубка и существенно не влияет на уровень гидравлических потерь, особенно при малых расходах воздуха.

При разработке и внедрении пылеуловителей модели ВАВЗПЦ такие конструкции раскручивателей не получили широкого распространения вследствие их отрицательного влияния на устойчивость гидродинамики в сепарационной камере, а также из-за значительного роста гидравлических потерь при больших скоростях потоков.

Оформление нижней части выходного патрубка ВАВЗПЦ в виде «капли» (рис. 1,и) эффективно прежде всего тем, что её каплевидная форма способствует плавному входу части вторичного потока при минимальном его расходе, то есть при кратности  $K=0,70-0,65$ . При этом помимо небольшого снижения сопротивления может иметь место и увеличение эффективности сепарации мелких частиц пыли из слоёв вторичного потока, обтекающих внешнюю поверхность выходного патрубка.

В технике сухого обеспыливания наибольшее распространение получили раскручивающие устройства в виде концевой улиточной раскручивателя [6] (рис. 1,к), с помощью которого кроме стабилизации потока изменяют и его направление, что особенно важно при необходи-

мости размещения аспирационных систем в стеснённых производственных условиях. Как правило, все типовые центробежные пылеуловители оснащены раскручивающими улитками, которые особо эффективны при групповой компоновке аппаратов в аспирационных системах, а также при необходимости разработки компактных комбинированных установок. При необходимости отбора части очищенного потока для технологических нужд эффективны также и двойные раскручивающие «улитки» (рис. 1, л), которые практически не приводят к росту гидравлических потерь.

Улиточные раскручиватели, устанавливаемые непосредственно на выходном патрубке модели ВАВЗПЦ, в конструктивном отношении довольно просты и способствуют как снижению общих энергетических затрат, особенно при высоких расходах и кратностях потоков, так и стабилизации гидродинамического режима в рабочей камере практически во всём диапазоне его рабочих параметров.

Следует отметить тот факт, что во многих случаях те конструктивные решения инновационного характера, которые являются приемлемыми для повышения эффективности работы однопоточных циклонов, для двухпоточных вихревых пылеуловителей, в том числе и для модели ВАВЗПЦ [7,8], часто оказывают отрицательное влияние на их основные характеристики.

Для общей оценки влияния различных раскручивающих устройств на эффективность пылеулавливания и гидравлические потери в типовой модели ВАВЗПЦ проводились экспериментальные исследования, в ходе которых были установлены некоторые гидродинамические особенности [1], в частности характер движения закрученного потока в выходном патрубке. Исследования проводились в равных условиях с использованием трёх типоразмеров:  $D_a=100, 200$  и  $400$  мм. Было установлено, что гидродинамика в проточной части выходных патрубков пылеуловителей указанных типоразмеров практически одинакова.

На рис. 2 показан характер течений в проточной части выходного патрубка в зависимости от гидродинамических режимов в рабочей части аппарата.

Как известно, степень закрученности вращающегося потока характеризуется соотношением тангенциальной и аксиальной составляющей скорости [5]. Если такое соотношение минимально (преобладание аксиальной составляющей над тангенциальной), то мы будем наблюдать картину течения (1) – поток будет слабо закрученным. Такой характер течения в выходном патрубке характеризуется полем осевых скоростей, отвечающим гидродинамическому режиму «уноса» [5] в сепарационной камере ВАВЗПЦ

(при кратности потоков  $K=0,65-0,70$ ). Общий уровень гидравлических потерь в выходном патрубке в этом случае минимален и определяется лишь трением потока о стенки.

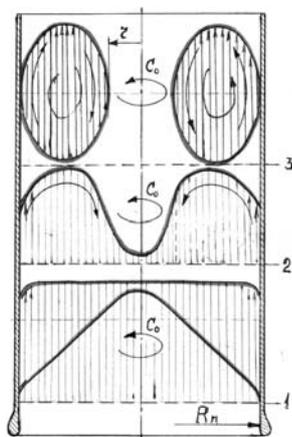


Рис. 2. Характер течений в выходном патрубке в зависимости от степени закрученности потока: 1 – слабо закрученный; 2 – умеренно закрученный; 3 – сильно закрученный

Режим «взвешенного слоя», организованный в рабочей камере ВАВЗПЦ (при  $K=0,7-0,75$ ), иллюстрирует картина течений (2), когда по оси выходного патрубка появляется характерная для закрученного потока воронка с пониженным в приосевой зоне давлением и образованием обратных токов. В умеренно закрученном потоке гидравлические потери в выходном патрубке значительно выше по сравнению со слабо закрученным.

Для сильно закрученного потока (при  $K=0,75-0,8$ ), поступающего из сепарационной камеры в выходной патрубок, для всей его проточной части характерно образование тороидального профиля вихревого течения с замкнутым контуром обратных токов (3) с максимальным разрежением в приосевой зоне на некотором радиусе  $r$ . При таком режиме, даже при незначительном увеличении общего расхода воздуха в сепарационной камере, наблюдается резкий рост гидравлических потерь, обусловленный сильной турбулизацией потока и трением его о стенки.

Для вихревых пылеуловителей модели ВАВЗПЦ установлены наиболее приемлемые с точки зрения степени пылеулавливания и уровня энергозатрат границы условной («плановой») скорости потока в сепарационной камере: нижняя –  $W_a=4,0$  м/с, верхняя –  $W_a=8,85$  м/с. В указанном диапазоне скоростей были проведены экспериментальные исследования по определению гидравлических потерь в выходном патрубке, результаты которых представлены на рис. 3.

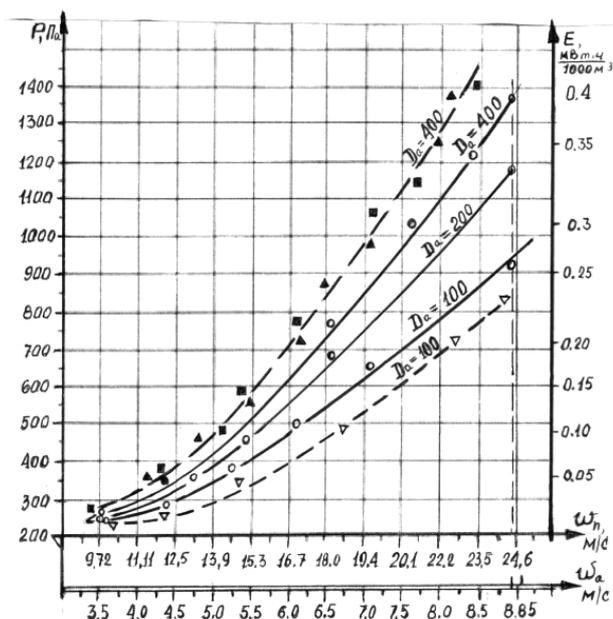


Рис. 3. Гидравлические потери ( $P$ ) и удельные энергозатраты ( $E$ ) в выходном патрубке в зависимости от условной скорости ( $\omega_n, \omega_a$ ) потоков: — без раскручивающих устройств;  $\nabla$  — с раскручителем типа «улитка»;  $\blacksquare$  — с раскручителями (рис. 1,г и 1,д);  $\blacktriangle$  — с раскручителями (рис. 1,в; 1,е и 1,ж)

Гидравлические потери определялись в одинаковых условиях для трёх типоразмеров ВАВЗПЦ (100, 200 и 400 мм), без раскручивающих устройств (Л%), с отдельными раскручивателями для модели 400 мм (% ,1%), а также раскручивающим устройством в виде «улитки» () для модели 100 мм. Режим в сепарационной камере ВАВЗПЦ был установлен на уровне эффективного пылеулавливания (при  $K=0,80$ ).

Как видно из графиков, только раскручиватели типа «улитка», установленные непосредственно за выходным патрубком, способствовали существенному снижению уровня гидравлических потерь практически во всём диапазоне условных скоростей. Для всех других конструкций раскручивателей характерен рост удельных энергозатрат, особенно при больших скоростях потоков ( $\omega_a$ ), соответствующих максимальной производительности аппарата по очищаемому воздуху. Следует отметить, что и для других типоразмеров ВАВЗПЦ кривые потерь давления (показаны пунктиром) имеют одинаковый характерный вид.

На рис. 4 показаны экспериментальные кривые, характеризующие общие потери давления и энергоэффективность трёх типоразмеров модели ВАВЗПЦ, определённые без раскручивающих устройств и с раскручивающими устройствами типа «улитка» в диапазоне условных плановых скоростей.

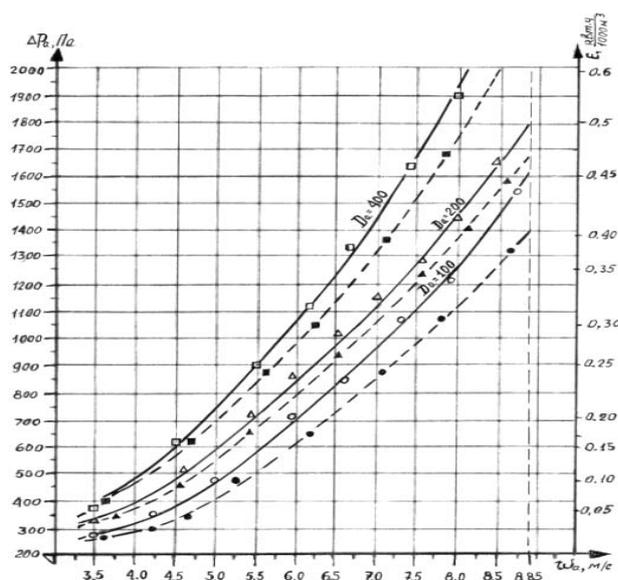


Рис. 4. Общие потери давления в пылеуловителях модели ВАВЗПЦ: —□—, —△—, —●— без раскручивающих устройств; —■—, —▲—, —●— с устройством типа «улитка»

Как видно из рис. 4, практически во всём диапазоне производительности каждого из типоразмеров моделей ВАВЗПЦ применение улиточных раскручивателей способствует снижению общих гидравлических потерь, или энергозатрат на пылеулавливание. Эти данные касаются лишь вихревых пылеуловителей одиночного исполнения, работающих в «сети», и не распространяются на пылеуловители других типов и моделей.

Для определения общей эффективности пылеулавливания вихревыми пылеуловителями модели ВАВЗПЦ, в производственных условиях были испытаны два типоразмера – с диаметром сепарационной камеры 200 и 400 мм. Испытания проводились в равных условиях с использованием раскручивателей разных типов и без них.

Результаты определения общей эффективности улавливания пыли доломита (основной составляющей шихты стекольного производства с параметрами  $d_{50}=18$  мкм;  $\sigma_n^1=5,0$ ;  $\rho_n=2100$  кг/м<sup>3</sup>) при кратности потоков  $K=0,80$  (режим высокоэффективного пылеулавливания) представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, применение улиточных раскручивателей приводит к повышению общей степени сепарации частиц во всём диапазоне производительности пылеуловителя, что обусловлено повышенной устойчивостью гидродинамического режима в сепарационной камере. Использование других конструкций раскручивателей показало отрицательное влияние на эффективность пылеулавливания вследствие нарушения гидродинамики потоков в выходном

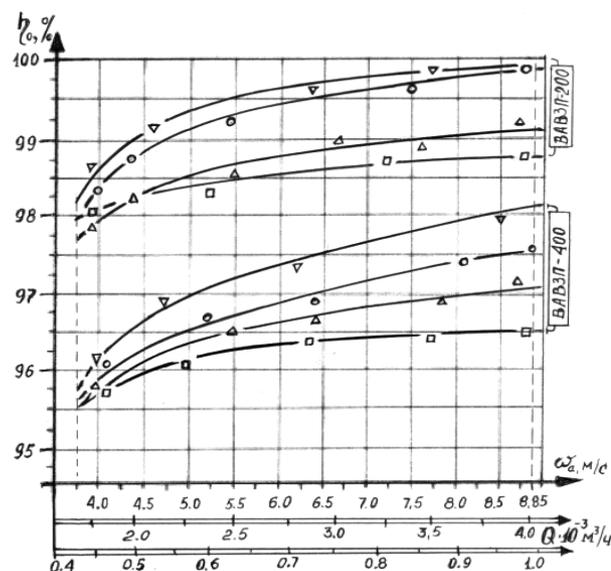


Рис. 5. Общая эффективность пылеулавливания модели ВАВЗПЦ: —□— без раскручивающих устройств; —△— с раскручивателями по рис. 1, в, е, ж; —□— с раскручивателями по рис. 1, г, д; ▽— с раскручивателем типа «улитка»

патрубке, что в конечном счёте приводило к нарушению устойчивости гидродинамического режима непосредственно в сепарационной камере аппарата.

Таким образом, экспериментально установлено, что использование испытанных конструкций раскручивающих устройств (кроме улиточного исполнения), как непосредственно в проточной части выходного патрубка, так и за его пределами, приводит к ухудшению основных параметров эффективности работы вихревых пылеуловителей одиночного исполнения, что необходимо учитывать при проектировании новых и реконструкции действующих обеспыливающих аспирационных систем [7,8], создаваемых на базе модели ВАВЗПЦ, а также при конструировании аппаратов со встречными закрученными потоками для проведения отличных от пылеулавливания технологических процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исследование* вращающегося потока в выходном патрубке вихревого аппарата со встречными закрученными потоками / Якуба А.Р., Азаров Н.И., Галич Р.В., Галич В.Н., Кияшко В.К. // Наука і освіта 2003: Матеріали VI Міжнар. науково-практичної конф. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2003. – Т.12. – С.52-53.
2. *О гидравлических потерях* в выходном патрубке вихревых аппаратов / А.Р. Якуба, Р.В. Галич, В.Н. Галич, С.А. Тимчук // Динаміка наукових досліджень 2004: Матеріали III Міжнар. науково-практичної конф. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – Т.60. – С.72-74.

3. *Страус В.* Промышленная очистка газов: Пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 616 с.

4. *Очистка* промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.

5. *Центробежные* каплеуловители с лопастными завихрителями. Серия ХМ–14. Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация. – М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1980. – 50 с.

6. *Циклоны* НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, монтажу и эксплуатации. – Ярославль: ГИПРОГАЗООЧИСТКА, 1984. – 48 с.

7. *Галич Р.В.* Исследование, разработка и конструктивное оформление многофункциональных вихревых аппаратов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная механика. – 2013. – № 3/7 (63). – С.32-40.

8. *Конструктивное* усовершенствование вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками / Р.В. Галич, А.Р. Якуба, В.И. Склабинский, В.Я. Стороженко // Хімічна промисловість України. – № 3. – 2013. – С.75-83.

Поступила в редакцию 18.11.2013