

ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 621.928.9

Е.Ю. Темникова, М.Ю. Чернецкий, А.А. Дектерев, А.Р. Богомолов

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ТЕЧЕНИЯ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА σ FLOW

Химические вещества на всех стадиях технологического процесса химических предприятий, находясь в виде пыли, оказывают вредное воздействие на здоровье работающих, загрязняя воздух рабочей зоны. Для снижения запыленности среды используют улавливание пыли в местах ее выделения и скопления с последующей очисткой запыленного воздуха в аппаратах-пылеуловителях. Наиболее значимой и распространенной системой пылеочистки является очистка газопылевого потока при пневмотранспорте сыпучего материала.

Наиболее часто из современных аппаратов обеспыливания воздуха применяют механические сухие устройства, в которых пыль отделяется под действием сил тяжести и центробежной силы – циклоны, достоинством которых является их компактность, простота конструкции, что обуславливает значительное снижение стоимости пылеулавливающих установок. Основным недостатком циклонных аппаратов является пропорциональная зависимость степени пылеулавливания и затрат энергии на прокачку запыленного потока через пылеулавливающее устройство.

Одним из актуальных направлений современной гидродинамики и теплофизики является вихревая и струйная организация, а также самоорганизация на поверхностях траншейных покрытий в виде каверн, вихревых ячеек, которая позволяет существенно повысить эффективность тепломассообмена и снизить аэродинамическое сопротивление при обтекании таких поверхностей и предложить новые технические решения установок и аппаратов.

Интерес к проблеме вихревой интенсификации сепарации частиц из газопылевого потока в инерционных пылеуловителях с одновременным снижением их гидравлического сопротивления возник в результате анализа совместных экспериментальных и теоретических работ А.И. Леонтьева, И.А. Белова, С.А. Исаева, Н.А. Кудрявцева, Ю.А. Быстрова, П.И. Кудинова и др. [1-4] по турбулентным течениям при обтекании тел с помощью организованных крупномасштабных вихрей. Последнее десятилетие ознаменовалось существенным прогрессом в понимании физического механизма вихревой интенсификации тепло- и массообмена в окрестности рельефных поверхностей, причем во многом, при использовании мето-

дов численного моделирования.

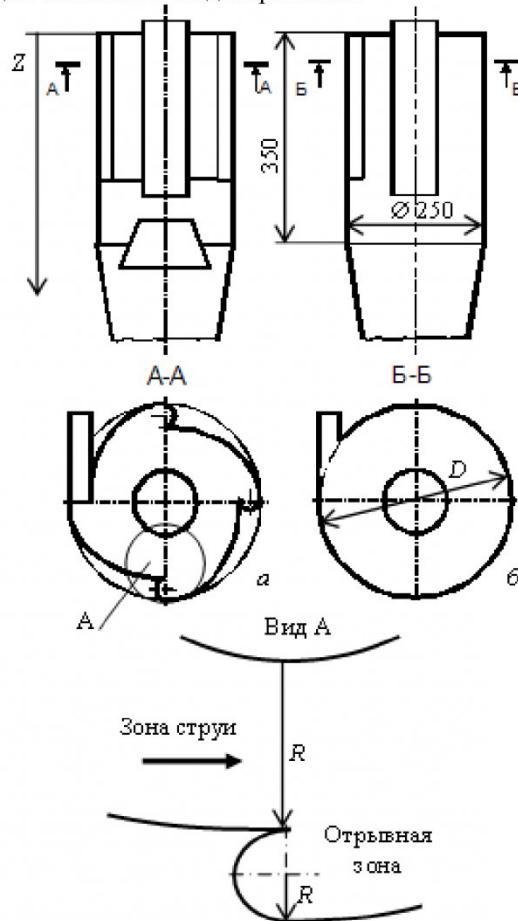


Рис.1. Схемы пылеуловителей:
а – циклон с внутренними элементами;
б – традиционный циклон

Существующие инженерные методики расчета аппаратов по очистке воздуха от твердых частиц до сих пор базируются на полуэмпирических уравнениях подобия и интегральных методах. Разработка и применение вычислительных технологий, реализованных в специализированных вычислительных пакетах программ, позволяют рассчитывать с приемлемой для практики точностью массообменные и гидродинамические характеристики в турбулентных пространственных стационарных отрывных вихревых течениях в многосвязных областях сложной геометрии.

На основе научных исследований, направлен-

Таблица 1. Экспериментальные данные

Тип циклона	Эффективность очистки η , %	Коэффициент сопротивления ζ
	условная скорость газа 2 м/с	
Традиционный циклон	99,60-99,78	530-545
Циклон с внутренними элементами	98,59-99,47	255-265

ных на разработку и реализацию наиболее эффективных систем и методов защиты человека от опасностей, могут быть достигнуты цели и задачи в области безопасности его жизнедеятельности.

Рассматриваемая проблема находится в русле приоритетных направлений развития науки и техники, определенных постановлением Правительства РФ от 21 июля 1996 г. № 2727/п-П8: разделы 1.6. Системы математического моделирования; 7. Экология и рациональное природопользование.

Анализ литературных источников, в том числе [5-6], связанных с сухой очисткой газов от твердых частиц, показал, что исследователи, занимающиеся разработкой новых конструкций пылеулавливающих устройств, используют нетрадиционные решения, включающие в себя установку внутренних рельефных поверхностей с отрывными зонами. Достаточно скучная информация по новым техническим способам и конструкциям дает право рассматривать предложенные решения направлением дальнейших экспериментальных и модельных исследований с целью понимания физического механизма вихревой интенсификации, управления и оптимизации процессов в сепарационных и пылеуловительных установках. Оптимизация процессов пылеочистки должна быть направлена на получение гармоничного соотношения величин степени улавливания дисперсной пыли и гидравлических потерь газоочистительного оборудования.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований газодинамики и эффективности пылеулавливания циклона с внутренними рельефными поверхностями и традиционной конструкции типа НИИОГАЗ, а также модельных исследований газодинамических структур течения в этих пылеуловителях.

Опыты проводились на экспериментальном стенде, достаточно подробно описанном в [7]. Здесь же изложена методика измерений и проведения эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились на аппарате, представляющем собой пылеуловитель (рис. 1, а) диаметром 250 мм, соотношения размеров которого, нормированных по диаметру, характерны циклону НИИОГАЗ ЦН-15. Кроме того, пылеуловитель имеет внутренние элементы: уступы (каверны), расположенные по образующей цилиндрической части аппарата и ограниченные высотой входного участка, и полый усеченный конус, обращенный вверх и установ-

ленный в нижней части цилиндрического корпуса пылеуловителя.

Для сравнения результатов исследований основных характеристик пылеуловителя с внутренними элементами был использован циклон с гладкой цилиндрической стенкой (рис. 1, б) с такими же геометрическими размерами (с соблюдением масштабного фактора).

Использовали пыль установки сухого тушения кокса с насыпной плотностью 661-706 кг/м³, дисперсией 1,745-1,697, медианным размером 27,4-36,65 мкм, углом естественного откоса 43,3° и подчиняющейся логарифмически-нормальному закону распределения частиц по размерам

Экспериментальные исследования газодинамики и эффективности (табл. 1) в циклонах показали, что гидравлическое сопротивление пылеуловителя с внутренними элементами в 2 раза меньше традиционного, а эффективность пылеулавливания традиционного циклона незначительно выше. Результаты экспериментального измерения тангенциальных и аксиальных скоростей основного потока для циклона с внутренними элементами (см. рис. 1, вид А) представлены на рис. 2 и 3. Здесь же (рис. 2 и 3) приведены профили соответствующих скоростей, полученные численным моделированием процесса течения потока в традиционном циклоне и с внутренними элементами. Опыты и моделирование проводили при расходе воздуха 360 м³/ч.

u , м/с

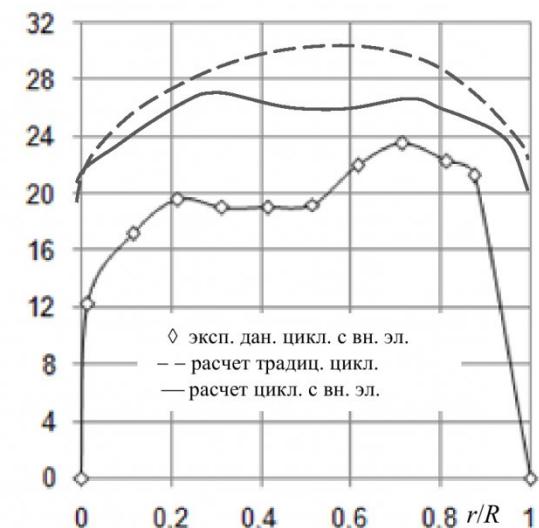


Рис. 2. Тангенциальная скорость в циклоне (сечение $Z = 0,11$ м)

При моделировании газодинамической структуры течения и гидравлического сопротивления аппаратов геометрия была одинаковой с циклонами, на которых проведены экспериментальные исследования эффективности пылеулавливания.

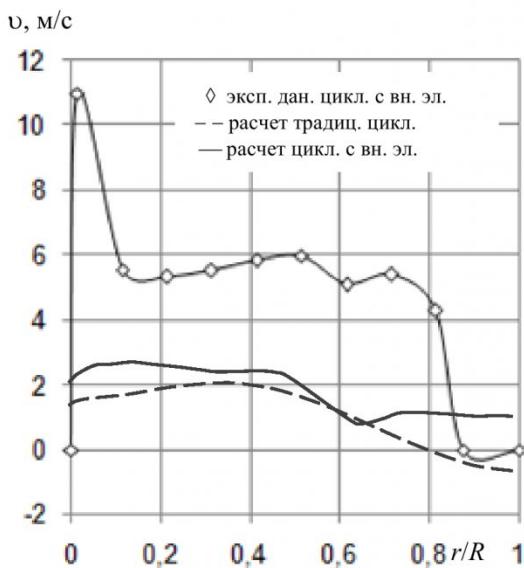


Рис. 3. Аксиальная скорость в циклоне (сечение $Z = 0,11$ м)

Вычисление выполнено с использованием программного комплекса σFlow. В качестве граничных условий на входе задавался расход воздуха. На выходе задавались условия Неймана. Для расчета использовалась многоблочная структурированная сетка, состоящая из 48 блоков для циклона с внутренними элементами из 42 блоков – традиционного, количество узлов 530000. Численный анализ течения газа внутри циклонного аппарата выполнен на основе метода контрольного объема для решения уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью широко известной двухпараметрической диссипативной RANS модели турбулентности: $k-\epsilon$ модель Чена. Для аппроксимации конвективных членов уравнений гидродинамики использовались схемы второго порядка TVD UMIST.

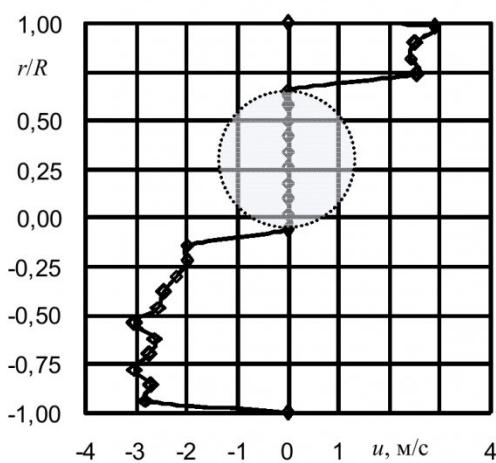


Рис. 4. Тангенциальная скорость в отрывной зоне (сечение $Z = 0,11$ м)

По результатам эксперимента в основном потоке струи имеется заметный максимум тангенциальной скорости, находящийся на некотором расстоянии от стенки вблизи среза уступа, затем – значительное уменьшение на некотором удалении от стенки. В центральной части скорость практически постоянна, и вновь у выхлопной трубы имеет место незначительный максимум, после чего скорость снижается до нуля. Наличие «впадины» или «провала скорости» в центральной части струи и значительного максимума у стенки циклона перед первой отрывной зоной, вероятно, связано с действием центробежных сил и уменьшением проходного сечения. Профиль тангенциальной скорости в циклоне с рельефными поверхностями, полученный численным решением, качественно согласуется с экспериментом (два максимума у стенок образующей поверхности цилиндра и выхлопной трубы и «впадина» в центральной части), но количественно отличается большими значениями скоростей приблизительно на 20-30 %. Профиль тангенциальной скорости в гладкоственном циклоне (традиционном) имеет выпуклую форму с одним максимумом, расположенным ближе к цилиндрической стенке, результатом которого, полагаем, является действие центробежных сил.

Экспериментальные результаты измеренных скоростей основного потока струи в аксиальном направлении (рис. 3) показывают, что вблизи стенки выхлопной трубы в пристенном слое толщиной около 5 мм имеет место достаточно интенсивное течение. Вблизи же криволинейной поверхности циклона в пристенной области толщиной также около 5 мм наблюдается резкое и значительное снижение аксиальной скорости практически до нуля. В центральной части потока струи аксиальная скорость имеет фактически постоянное значение. Численное моделирование по расчету аксиальных скоростей потока струи показывает качественное согласие для циклона с выступами только эффекта снижения скорости у прилегающей стенки циклона. Но толщина области с мень-

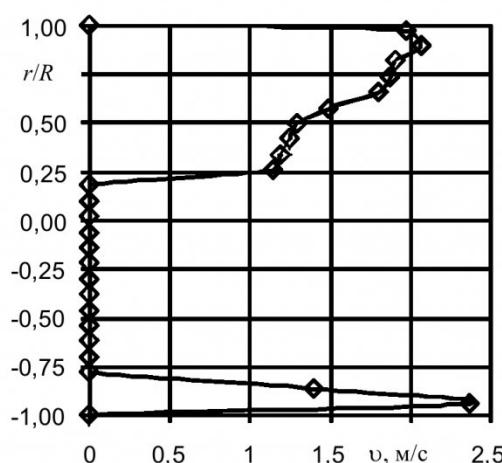


Рис. 5. Аксиальная скорость в отрывной зоне (сечение $Z = 0,11$ м)

шей скоростью значительно больше (до 20 мм). Расчет показывает заметно меньшие значения скоростей. Что касается традиционного циклона, то расчетные значения аксиальных скоростей чуть меньше, чем расчетные для циклона с выступами.

Из проведенного анализа вытекает, что экспериментальные результаты по тангенциальным и аксиальным скоростям для циклона с внутренними элементами качественно согласуются с численным моделированием. При сравнении этих данных с рассчитанными результатами для традиционного циклона можно сделать вывод, что в циклоне с рельефными поверхностями по сравнению с гладкими тангенциальная скорость имеет меньшие значения, а аксиальная – большие. Полагаем, что такое соотношение скоростей должно повлиять на общее гидравлическое сопротивление циклона, т.е. сопротивление циклона с внутренними элементами будет меньше, чем традиционного циклона. Экспериментальные результаты подтверждают этот вывод (табл.1). Существование достаточно высокой аксиальной скорости вблизи стенки выхлопной трубы, т.е. в зоне вторичных токов, где сосредоточены мелкие частицы пыли, говорит о возможности выноса их внутренним восходящим потоком и как следствие – о снижении эффективности циклона. Нужны технические решения для создания условий уменьшения в этой области аксиальных скоростей.

Для отрывной зоны представлены профили тангенциальной и аксиальной скорости, полученные экспериментально с помощью стандартной трубы Пито–Прандтля, на рис. 4 и 5, которые показывают, что в зоне отрыва происходит вращательное движение потока, направленное вниз в виде винтовой линии и имеющего форму разнотолщинной цилиндрической трубы. В отрывной зоне с небольшим смещением от центра существует область неподвижного цилиндра, где нет вращающегося потока. В [8] показано, что при относительно малых числах Рейнольдса, построенного по характерной угловой скорости на границе и безразмерному радиусу каверны, круглой каверны в центре вихря наблюдается невязкое ядро с линейным профилем скорости и с увеличением числа Рейнольдса наклон этого профиля не изменяется (т.е. завихренность в ядре не зависит от числа Рейнольдса), а область, занимаемая ядром, увеличивается. Кроме того, в обсуждении моделей расчета Бюргграфа, А. Горин [8] указывает, что с увеличением числа Рейнольдса возрастают инерционные члены и течение перестает быть симметричным относительно граничных условий (в качестве граничного условия Бюргграф принимает распределение скорости вдоль движущейся границы по закону косинуса). При $Re \rightarrow 0$ центр вихря находится на оси симметрии. Центр вихря для малых чисел Рейнольдса сдвигается в направлении движущейся границы, как в нашем случае (см. рис. 4). При высоких

числах Рейнольдса инерционные члены становятся определяющими, и центр вихря возвращается к центру круга и в пределе, при $Re \rightarrow \infty$, совпадает с ним.

Аксиальная скорость потока в зоне разрежения (см. рис. 5) достигает 2,3 м/с, что говорит о достаточно быстром перемещении частиц пыли, внесенных из газопылевого основного потока, с газовым потоком вниз, в то время как приведенная скорость, рассчитанная на все сечение циклона, равна 2 м/с. Оценки показывают, что расход потока через одну отрывную зону составляет $0,3 \div 0,5\%$ от общего расхода газа в циклоне. Видно, что отрывные зоны, имеющие меньшее давление [9] по сравнению с давлением в основном потоке, создают условия для переноса мелких частиц в зону отрыва, а сток потока вниз из отрывной зоны позволяет переместить их в направлении к бункеру пыли. Спиралевидное движение газопылевого потока вниз в отрывной зоне по результатам измерений тангенциальной и аксиальной скоростей показывает расхождение в расположении центров вихревого невязкого ядра и его размера. В диапазоне исследуемых режимов на основании измеренных тангенциальных скоростей расположение центра ядра в виде неподвижного цилиндра хорошо согласуется с расчетной моделью течения несжимаемой жидкости в круглой каверне Бюргграфа. Профиль аксиальных скоростей показывает, что центр невязкого ядра смешен ниже центра каверны и имеет несколько больший размер. Полагаем, что это различие связано с наличием стока в нижней (открытой) части каверны. Таким образом, сток изменяет картину течения газопылевого потока по вихревой спирали вниз. Значительная область (толщина вязкой структуры) аксиальных скоростей в зоне среза уступа, полагаем, неблагоприятна для сепарации частиц пыли из основного потока в отрывную зону более низкого давления, а тонкий слой аксиальных скоростей вблизи стенки цилиндра циклона, наоборот, говорит о надежном соприкосновении выделенных частиц пыли из основного потока и транспорта их в бункер.

На эффективность пылеулавливания оказывает большое значение распределения давлений и скоростей как в продольном, так и в поперечном сечении циклона. Численный расчет модулей скорости в продольном и поперечном сечениях (см. рис. 1) приведен на рис. 6.

Представленные изолинии модуля скорости нормированы на скорость во входном патрубке. Анализ показывает, что в продольном сечении скорость течения вблизи стенки цилиндра и конусной части циклона с гладкой стенкой имеет большие значения, чем в циклоне с кавернами. Такая же картина соответствует и для поперечно-го сечения. Только в области первой каверны вниз по потоку скорости мало отличаются в этих двух циклонах. Низкие скорости в отрывных зонах согласуются с экспериментально измеренными. Но

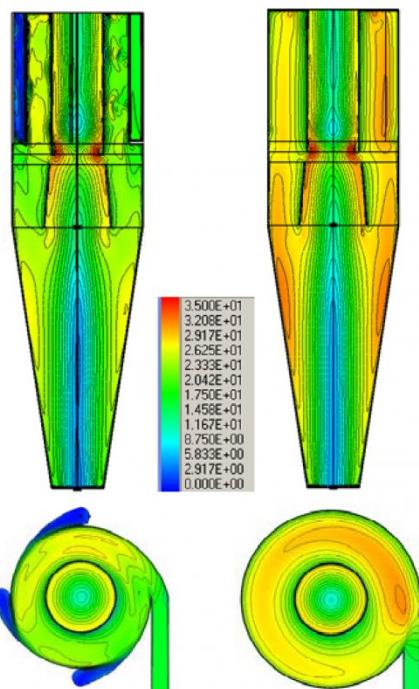


Рис.6. Изолинии модуля скорости в среднем и поперечном сечении циклона

более низкое давление в кавернах обусловлено вихревым движением, а значительное увеличение скорости в области стока (нижняя часть отрывной зоны) позволяет надежно перемещать частицы сепарированной пыли из основного потока в направлении бункера, несмотря на то, что скорости в продольном сечении меньше, чем в гладком циклоне. Скорости внутреннего восходящего потока в исследуемых циклонах практически не отличаются друг от друга. Необходимо отметить, что более устойчивое течение в выхлопной трубе наблюдается в гладком циклоне.

Показанные изолинии давления в продольном и поперечном сечении (см. рис. 1) на рис. 7 для исследуемых циклонов говорят о равномерном и

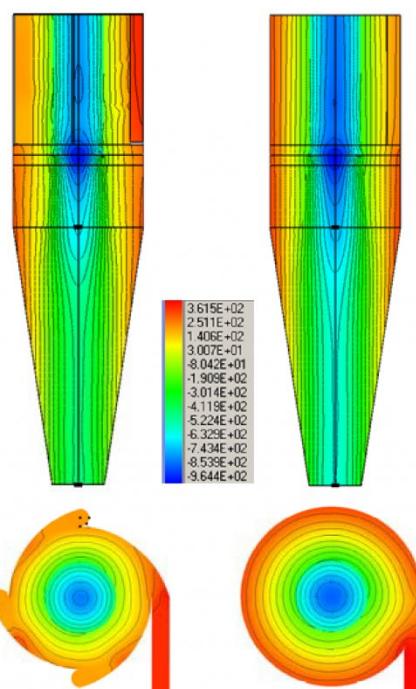


Рис.6. Изолинии давления в среднем и поперечном сечении циклона

равном давлению во входном участке, вдоль всей внутренней поверхности, распределении давлений в гладком циклоне и более низком и неравномерном давлении в циклоне, имеющем каверны, как в восходящем и нисходящем потоках, так и в поперечном сечении циклонов. Необходимо обратить внимание на результаты расчета циклона с рельефами, что в отрывных зонах наблюдается пониженное давление как по сравнению с основным потоком, так и с областями присоединения (натекания) основной струи на криволинейную поверхность стенок циклона. Неравномерность давлений в циклоне с внутренними элементами оказывает снижающее действие на эффективность очистки. При сравнении экспериментальных дан-

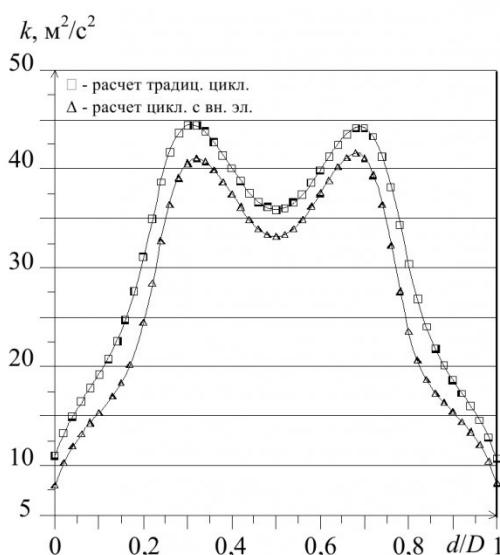


Рис. 8. Энергия турбулентных пульсаций (сечение $Z = 0,44 \text{ м}$)

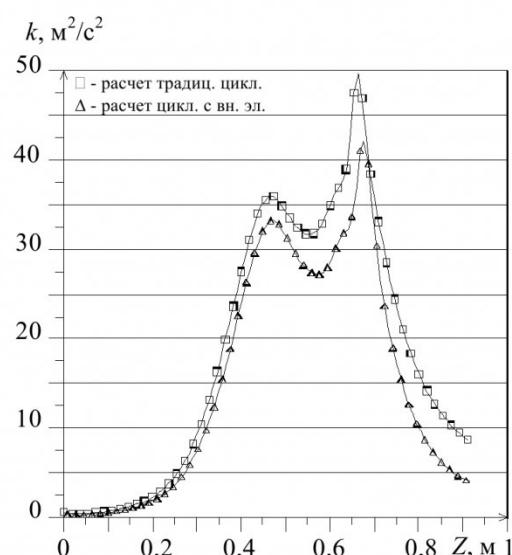


Рис. 9. Энергия турбулентных пульсаций по высоте циклона

ных для циклонов по степени очистки выявлено, что снижение эффективности циклона с внутренними элементами по сравнению с гладким циклоном незначительное (менее 0,7 %), хотя по степени неравномерности давлений отличия более заметные. Полагаем, что эта неравномерность компенсирована положительным влиянием наличия отрывных зон, способствующих улучшению сепарации мелких частиц пыли из основного потока в зоны разрежения и сноса их вниз вначале по спиралевидной траектории, а затем по стенкам конической части циклона в бункер.

Как показали расчеты, в традиционном циклоне ($\zeta = 491$) гидравлическое сопротивление больше, чем в конструкции с внутренними элементами ($\zeta = 334$) на 47% при тех же начальных условиях, что связано с меньшими тангенциальными и более высокими аксиальными скоростями в конструкции с уступами. Экспериментальные исследования показали снижение перепада давления для конструкции с уступами – 100 %.

Как видно из рис. 8 и 9, энергия турбулентных пульсаций в поперечном сечении и по высоте циклона имеет большие значения в традиционной конструкции приблизительно на 9%, чем в циклоне с уступами, что приводит к лучшей дисперсии частиц в потоке и увеличению эффективности циклона. Опыты подтвердили едва заметное сни-

жение значения эффективности циклона с уступами по сравнению с традиционным циклоном.

Технологии численного моделирования турбулентных потоков позволяют совершенствовать существующие конструкции циклонных аппаратов и создавать принципиально новые конструкции циклонов, которые будут иметь высокий коэффициент улавливания тонкодисперсных частиц при низком гидравлическом сопротивлении.

Предлагаемая авторами конструкция циклона со встроенными внутренними элементами (уступами), где при движении образуются отрывные зоны, в которых создается разрежение по сравнению с основным потоком, способствует значительному снижению гидравлического сопротивления и незначительному уменьшению интенсивности улавливания частиц. Энергетическая оценка работы каскада из 2 циклонов с внутренними уступами показывает большую интенсивность пылеулавливания по сравнению с традиционным циклоном при равных эксплуатационных затратах. В работе [10] отмечено, что при размере частиц 30 мкм вихревой аппарат ВЗП-М 200 дает значение эффективности около 98,4 %. Разработанный авторами циклон при равных газодинамических условиях и размерах частиц диаметром 250 мм экспериментально показал более высокие коэффициенты улавливания – 98,6–99,15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. – СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 108 с.
2. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
3. Исаев, С. А. Численный анализ струйно-вихревой картины течения в прямоугольной траншее / С. А. Исаев, П. И. Кудинов, Н. А. Кудрявцев, И. А. Пышный // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 2. – С. 24-30.
4. Кудинов, П. И. Численное исследование пространственного неустойчивого течения в бесконечной каверне // Вестник Днепропетровского унив. Серия Механика. – 2002. Выпуск 6. – Т. 1. – С. 48-53.
5. Завьялов, Ю. И. Нетрадиционное оборудование для очистки газопылевых выбросов в металлургии // Металлообработка. – 2003. - № 1 (13). – С. 36-40.
6. Пат. 2174452 Российская Федерация, МПК⁷ B 04 C 5/103. Пылеуловитель / Завьялов Ю. И.; заявитель и патентообладатель ООО «ПЛАНЕТА-К» - № 2000125875/12; заявл. 10.10.00; опубл. 10.10.01. – 5 с.: ил.
7. Темникова, Е. Ю. Исследование характеристик циклона с внутренними элементами / Е.Ю. Темникова, А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2009. – № 2. – С. 140-144.
8. Горин, А. В. Обзор моделей расчета течения несжимаемой жидкости в квадратной каверне / А.В. Горин // Градиентные и отрывные течения: сб. научн. тр. – Новосибирск: ИТ, 1976. – С. 85-116.
9. Богомолов, А. Р. Экспериментальная установка по исследованию аппарата сухого пылеулавливания / А.Р. Богомолов, П.Т. Петрик, Е.Ю. Темникова // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2005. – № 4.2. – С. 67-71.
10. Поляков, С. Н. Анализ эффективности пылеулавливания вихревого аппарата ВЗП-М 200 с помощью программного комплекса ANSYS CFX // ANSYS Advantage. Русская редакция. 2008. Весна 2008 (7). – С. 29-33.

□ Авторы статьи:

Темникова
Елена Юрьевна
– ст. преподав. каф. про-
цессов, машин и аппаратов
химических производств
КузГТУ,
teu.pmahp@kuzstu.ru

Чернецкий
Михаил Юрьевич
– аспирант Института теп-
лофизики СО РАН,
MicCh@yandex.ru

Дектерев
Александр Анатольевич
– канд. техн. наук, с.н.с.
ИТ СО РАН,
dekterez@mail.ru

Богомолов
Александр Романович
– докт. техн. наук, с.н.с.
Института теплофизики
СО РАН, доц. каф. процес-
сов, машин и аппаратов
химических производств
КузГТУ, barom@kuzstu.ru