

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЯМОТОЧНОГО БАТАРЕЙНОГО ЦИКЛОНА СО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПОТОКАМИ

Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк

*Изложены результаты исследований аэродинамики и эффективности улавливания изотермической модели батарейного циклона со взаимодействующими потоками. Сделан вывод о том, что взаимодействие закрученных потоков увеличивает эффективность улавливания. Приведены данные для выбора оптимального заглубления выхлопных труб золоуловителя.*

*The article provides the results of research of aerodynamics and collection effectiveness of isothermal multicyclone model with interactive flows. It was concluded that interaction of involute flows enhances collection efficiency. The data for chose of optimal penetration of the collector's exhaust pipes are presented.*

Обычно выделяют следующие основные требования к уловителям циркулирующих частиц, а также к уловителям предварительной очистки газов: высокая эффективность улавливания частиц крупнее 50 мкм; низкое аэродинамическое сопротивление; устойчивость к износу; простота конструкции.

Опыт показывает, что наибольшей эффективностью обладают уловители центробежного типа. В качестве примера центробежного уловителя может служить циклон. Среди известных циклонов наименьшим сопротивлением обладает прямоточный [1].

Объединение циклонов в батарейный блок позволяет снизить требования к точности их изготовления и значительно проще компоновать их в объеме котла или котельной [2].

В качестве аэродинамической модели был выбран уловитель (рисунок 1), содержащий две симметричные ячейки. Корпус уловителя 1 имел сечение 300×600 мм, высоту – 600 мм. К верхней части корпуса уловителя, имеющей входное окно 184×200 мм, крепился горизонтальный участок 2, обеспечивающий тангенциальный вход потока.

Выходные каналы 3 циклона состояли из двух труб внутренним диаметром 180 мм, заглубленных на величину  $a$  в корпус уловителя.

Внутри корпуса уловителя (рисунок 2) радиально-симметрично могли устанавливаться вытеснители потока 4, представляющие собой пластины, имеющие форму части цилиндрической поверхности с радиусом изгиба  $R$ , приблизительно равным половине поперечного размера ячейки ( $\approx 150$  мм) и длину дуги  $l_R \approx 130$  мм. Вытеснители потока

крепилась в нескольких точках к корпусу уловителя так, что между пластинами и корпусом образовались зазоры (10 мм), которые служили в качестве входных и выходных щелей для запыленного потока. Полости, отделенные вытеснителями от внутренней части уловителя, служили в качестве улавливающих карманов 5, а выходные щели в них были необходимы для рециркуляции потока. Снизу улавливающих карманов были расположены сборные бункера 6, из которых уловленные частицы попадали в сборные емкости. Сверху корпус уловителя закрывался прозрачным листом из оргстекла, что позволяло вести прямые наблюдения за аэродинамикой потока.

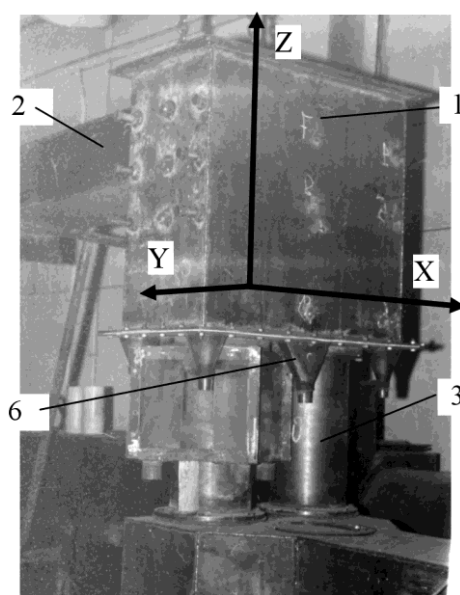


Рисунок 1 – Модель прямоточного батарейного циклона с тангенциальным входом

Поле скоростей потока измерялось с помощью пневмометрических зондов (трубок Прандтля и ВТИ) [3]. Направление скорости потока определялось визуально с помощью тонких нитей.

В качестве материала использовался кварцевый песок, интегральный ситовой остаток которого  $R(\delta)$  имел вид прямой в двойной логарифмической системе координат и, следовательно, соответствующей распределению Розина-Раммлера [4] и два вида золы, расщепочные характеристики которых соответствовали логарифмически нормальному распределению. Медиана распределения диаметров частиц песка составила  $\delta_{50} = 200$  мкм. Медиана распределения и стандартное отклонение диаметров частиц от среднего значения для золы были равны:  $\delta_{50} = 63$  мкм,  $\sigma = 4,6$  и  $\delta_{50} = 30$  мкм,  $\sigma = 7,4$ .

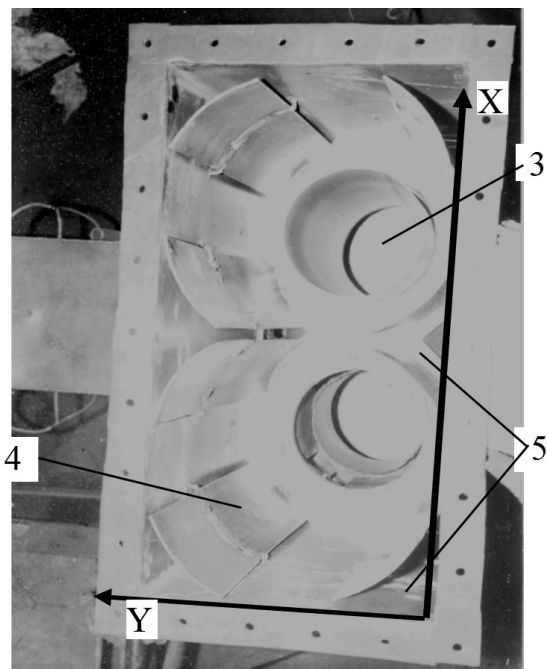


Рисунок 2 – Модель циклона со снятой верхней крышкой (вид сверху)

Эффективность улавливания дисперсного материала определялась весовым методом по формуле

$$\eta = \frac{M_{\text{ул}}}{M_0} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $M_{\text{ул}}$  – масса уловленного материала,  $M_0$  – масса подаваемого материала. Также рассчитывалась относительная масса материала, собирающегося в каждой колбе

$$\tilde{M} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{ул}}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $M_{\text{к}}$  – масса материала в каждой сборной емкости ( $K=1...6$ ).

Первоначально, чтобы оценить влияние вытеснителей на работу уловителя, вытеснители были убраны. На рисунке 3 приведена составляющая профиля скорости вдоль входного потока.

Положительное значение скорости  $w_y$  соответствует направлению входящего потока, отрицательное значение – обратному движению потока.

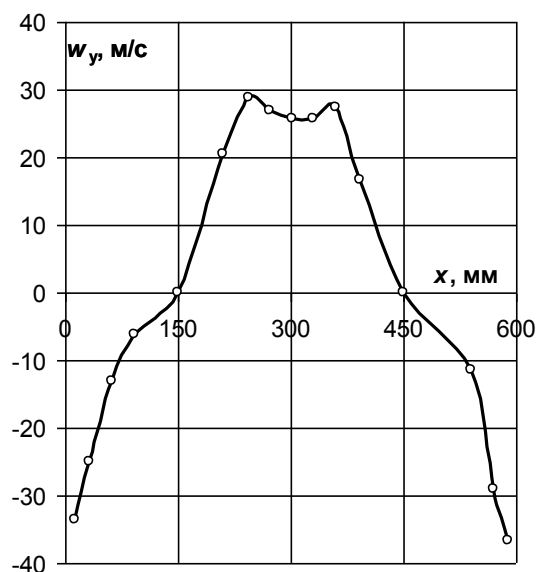


Рисунок 3 – Профиль скорости батарейного циклона без вытеснителей потока ( $Y = 90$  мм,  $Z = 500$  мм)

Без вытеснителей потока профиль скорости оказался симметричным. По центру видно разделение потока на две ячейки.

В ходе испытаний установлено, что с увеличением заглубления выхлопных труб ( $a = 35 - 300$  мм) сопротивление циклона заметно возрастает ( $\xi = 80 - 120$ ) в зависимости от скорости потока. С увеличением скорости потока значение  $\xi$  уменьшается, т.е. зависимость перепада давления от среднерасходной скорости не является квадратичной.

Характер распределения массы уловленных частиц по емкостям, практически не зависит от скорости потока (небольшое влияние скорости на сепарацию заметно только при заглублении  $a = 300$  мм), зато существенно зависит от величины заглубления.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЯМОТОЧНОГО БАТАРЕЙНОГО ЦИКЛОНА СО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПОТОКАМИ

В экспериментах получено, что распределения материала по периферийным точкам ввода является несимметричным (различие составляет  $\approx 40\%$  для заглупления  $a = 100$  мм). Для  $a = 300$  мм асимметрия составляет  $\approx 20\%$  и практически не наблюдается при  $a = 200$  мм. В центральной зоне уловителя, где происходит взаимодействие закрученных потоков, сепарируется минимальное количество материала.

Общая эффективность улавливания (рисунок 4) существенно зависит от заглупления выхлопных труб и слабо зависит от скорости.

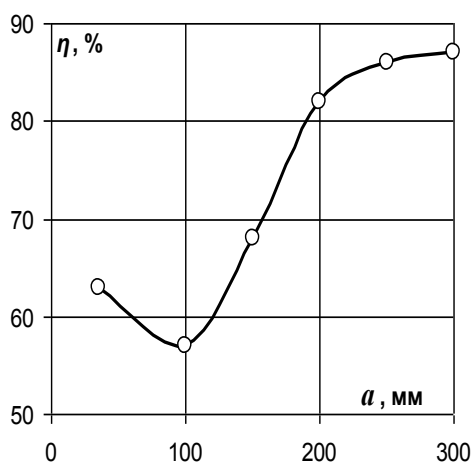


Рисунок 4 – Зависимость эффективности улавливания частиц от величины заглупления  $\alpha$  в диапазоне скоростей потока 4-8 м/с

Следует отметить, что эффективность улавливания и коэффициент сопротивления увеличивается с ростом заглупления. Оптимальным можно считать значение  $a \approx 200$  мм. Благодаря тому, что верхняя крышка была прозрачной, визуально было заметно, что частицы двигаются в ячейках уловителя по ломаным траекториям за счет соударения со стенками корпуса. Кроме того, происходит накопление частиц в потоке у дна уловителя. В углах уловителя наблюдались вихреобразные движения потока (локальные вихри).

Установка вытеснителей существенно изменила аэродинамику потока.

На рисунке 5 приведен профиль скорости, измеренный с помощью трубки ВТИ.

Из рисунка видно, что особенностью движения потока в ячейке является малая величина области в центре вихрей, где составляющая скорости равна нулю. Это выражается в том, что кривая распределения скорости при смене направления имеет очень крутой ход, по сравнению с уловителем без вытеснителей потока.

крутой ход, по сравнению с уловителем без вытеснителей потока.

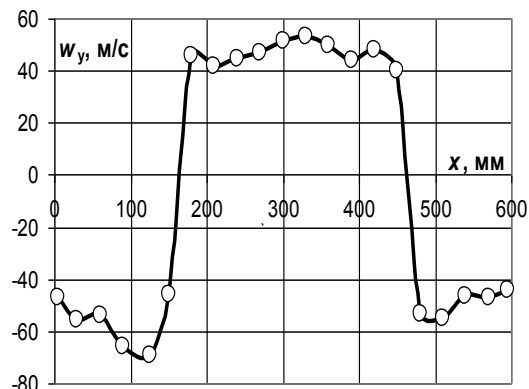


Рисунок 5 – Профиль скорости батарейного циклона с вытеснителями потока ( $Y = 150$  мм,  $Z = 500$  мм)

Из рисунка видно, что особенностью движения потока в ячейке является малая величина области в центре вихрей, где составляющая скорости равна нулю. Это выражается в том, что кривая распределения скорости при смене направления имеет очень крутой ход, по сравнению с уловителем без вытеснителей потока.

При малых заглуплениях выходных каналов и скоростях ниже 6 м/с профиль скорости становился несимметричным. Несимметричность аэродинамики ячеек может быть связана с взаимодействием вихревых потоков, при котором происходит «перекачка» энергии из одного вихря в другой, так как вихревая система заведомо обладает определенной неустойчивостью.

Влияние вытеснителей потока на аэродинамику уловителя проявилось также в повышении сопротивления за счет увеличения скорости вихревого движения примерно в 1,4 раза. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости сохранилась, т.е. зависимость давления от скорости не является квадратичной.

Общее сопротивление уловителя растет с ростом величины заглупления  $a$  ( $\xi = 110 - 140$ ), при этом доля сопротивления входное сопротивление наоборот уменьшается и составляет от общего  $\approx 14\%$ .

Таким образом, установка вытеснителей дает увеличение сопротивления в основном за счет выхода. Это связано с возрастанием тангенциальной составляющей скорости по-

тока в вихрях. Она существенно превышает среднюю скорость на входе.

С установкой вытеснителей меняется и характер сепарации твердых частиц. Она становится несимметричной.

При заглублении  $a = 35$  мм наблюдается максимум, где происходит осаждение частиц ( $\bar{d}_{50} = 200$  мкм) при слиянии двух закрученных потоков на границе ячеек уловителя. При разделении потоков между ячейками эффект сепарации значительно меньше. Осаждение материала одинаково только при заглублении  $a = 200$  мм. С ростом скорости при  $a = 35$  мм асимметрия улавливания частиц по точкам вывода увеличивается. Наиболее стабильный характер имеет осаждение частиц по периферийным точкам.

Фракционный состав частиц также оказывает влияние на процесс улавливания материала. Для золы ( $\bar{d} = 63$  мкм) наблюдалось увеличение массы улавливаемых частиц в сходящихся потоках. В расходящихся потоках при  $a = 200$  мм масса уловленных частиц не изменилась и резко уменьшилась при  $a = 100$  и  $300$  мм. Асимметрия ячеек по-прежнему сохранилась. При скорости  $4$  м/с осаждение золы в сходящихся и расходящихся потоках ( $a = 200$  мм) одинаково и также одинаково распределение материала по периферии ячеек уловителя.

Зависимость общей эффективности улавливания песка от величины заглубления  $a$  приведена на рисунке 6. Кривая  $\eta(a)$  имеет максимум при  $a = 200$  мм. Зависимость эффективности улавливания от скорости выражена слабее. При  $a = 100-200$  мм наблюдается небольшое снижение эффективности улавливания с ростом скорости потока.

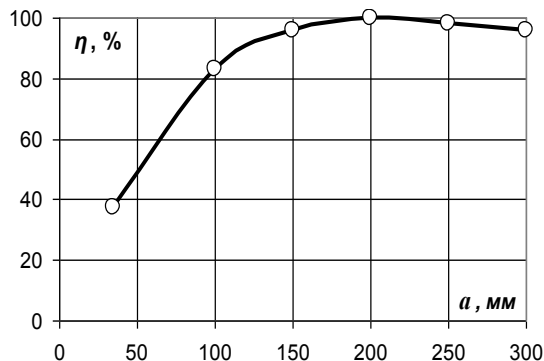


Рисунок 6 – Зависимость эффективности улавливания частиц песка от величины заглубления с вытеснителями потока

Для золы получена другая закономерность (рисунок 7).

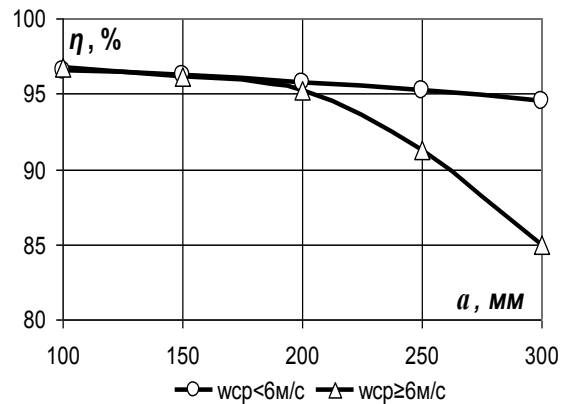


Рисунок 7 – Зависимость эффективности улавливания частиц золы от величины заглубления с вытеснителями потока

Эффективность улавливания практически не зависит от скорости при  $a \leq 200$  мм и начинает резко падать с ростом скорости при  $a = 300$  мм. Падение эффективности улавливания с ростом заглубления можно объяснить влиянием выхода на входящий горизонтальный поток запыленного воздуха. При мелкодисперсном материале часть частиц золы попадает в выхлопные трубы, минуя вихревое движение потока. Наличие вытеснителей в конструкции уловителя обеспечивает более высокую эффективность улавливания, чем при их отсутствии (в частности для песка с 85% до 100% при  $a = 200$  мм).

Как отмечалось выше, данный уловитель является системой двух взаимодействующих закрученных потоков. Для изучения влияния этого взаимодействия на эффективность сепарации частиц из потока ячейки уловителя разделялись вертикальными перегородками различной высоты  $h$ . Увеличение высоты перегородки уменьшало область взаимодействия потоков. Значение  $h = 600$  мм соответствовало полному разделению уловителя на две изолированные ячейки.

Несимметричность осаждения материала по периферии ячеек, наблюдаемая при  $h = 0$  практически исчезла при установке перегородки между ячейками  $50 \leq h \leq 100$  мм. При  $h = 200$  асимметрия сместилась в другую сторону и возросла при  $h \geq 400$  мм. Без перегородки сепарация в сходящихся потоках значительно больше, чем в расходящихся. Для  $h \geq 50$  мм различие становится наибольшим. Общая эффективность улавливания золы

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЯМОТОЧНОГО БАТАРЕЙНОГО ЦИКЛОНА СО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПОТОКАМИ

( $\bar{d}_{50} = 63$  мкм) падает с ростом высоты перегородки (рисунок 8).

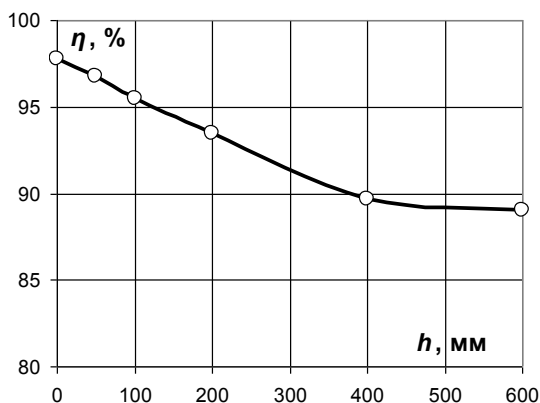


Рисунок 8 – Зависимость эффективности улавливания частиц золы от высоты перегородки

Различие в эффективности улавливания при взаимодействующих потоках и изолированных составляет  $\approx 10$  %, т.е. взаимодействие потоков ведет к увеличению эффективности улавливания и снижает пропуск частиц в 6 раз.

### ВЫВОДЫ

Изучение аэродинамики и эффективности улавливания модели прямоточного батарейного циклона показали следующее.

Пройдя направляющий аппарат, запыленный поток приобретает вращательное движение, центр которого совпадает с осями выхлопных труб уловителя. Установка вытеснителей потока увеличивает скорость его закрутки. Вращающийся поток одновременно обладает опускным движением. У дна уловителя опускное движение потока сменяется подъемным, которое происходит по внешней поверхности выхлопных труб до входа в них. Частицы, вошедшие с потоком воздуха, силами инерции отбрасываются к стенкам уловителя. Часть из них попадает во входные щели улавливающих карманов. Внутри карманов наблюдается образование вторичных

вихревых потоков. За счет этого некоторые частицы теряют скорость и оседают. Другие частицы проскакивают через улавливающие карманы в выходные щели и вновь попадают в поток. Наибольшее количество частиц скапливается в придонной области ( $\approx 50$  мм) уловителя. В этой области и происходит наиболее интенсивная сепарация частиц в улавливающих карманах. Во вращающихся потоках происходит интенсивный обмен частицами. Это проявляется в том, что когда материал вводится в одну из ячеек, он сразу же перераспределяется между двумя ячейками, причем довольно равномерно. Это обстоятельство делает устойчивым такой уловитель к неравномерной запыленности на входе, в отличие от изолированных друг от друга циклонных элементов. Кроме того, взаимодействие закрученных потоков однозначно увеличивает эффективность устройства.

При выборе оптимального заглубления труб необходимо учитывать, что снижение сопротивления уловителя связано с уменьшением его эффективности. В меньшей степени это проявляется при выборе скорости  $w_{cp}$ . Кроме того, характер сепарации частиц сильно зависит от фракционного состава материала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер, М. И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; Под. общ. ред. А.А. Русанова – М: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
2. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля и др. – М.: Энергия, 1997. – 296 с.
3. А. с. 1766468 СССР, А 1 М.к.и. В 01D 45/12, В 04 G 5/28 7/00. Батарейный циклон / Пузырев Б.М., Сидоров А.М., Лемеш В.Н.; опубл. 07.10.92, Бюл. № 37.
4. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Химия, 1987 – 264 с.