

число экспериментальных точек в опыте.

Так как расчетные значения критерия Фишера меньше табличного, рассеяние экспериментальных кинетических данных относительно данных, рассчитанных по кинетическому уравнению, одного порядка с рассеянием, вызванным случай-

ными отклонениями в опытах. Вывод об адекватности кинетического уравнения (6) подтверждается графическим сопоставлением расчётных и экспериментальных данных (рисунок).

Таким образом, предложенный метод определения лимитирующей стадии может быть использован для изучения

механизма процессов набухания сетчатых полимеров и выбора кинетических уравнений для их описания. В качестве таких уравнений могут быть использованы кинетические уравнения, полученные на основе модели процесса на частице с невзаимодействующим ядром.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков Г.В., Есипов Г.З. Описание кинетики взаимодействия сферических частиц сетчатых полимеров в квазистационарных условиях с жидкими средами на основе представлений о невзаимодействующем ядре // Высокомолекулярные соединения. 1980. № 6. с. 147–152.
2. Ушаков Г.В., Есипов Г.З., Макридин В.П., Журавлëв В.А. Некоторые аспекты макрокинетики взаимодействия пространственно-сшитых полимеров с жидкими средами. В кн. Получение, свойства и применение полимерных материалов. – М.: НИИТЭХИМ, 1978. с. 73–83.
3. Есипов Г.З., Журавлëв В.А., Ушаков Г.В. Исследование влияния условий синтеза на формирование структуры сополимеров стирола и дивинилбензола. В кн. Диффузионные явления в полимерах, ч. 2. Труды Всесоюзной конференции. – Рига, 1972. с. 261–263.
4. Левеништиль О. Инженерное оформление химических процессов // М.: Химия, 1969. – 621 с.
5. Wen C.Y. Noncatalytic heterogeneous solid fluid reaction models. // Ind. Eng. Chem. 1968, V. 60, № 9. P. 34–51.
6. Журавлëв В.А., Есипов Г.З., Ушаков Г.В. Устройство для исследования процессов набухания твёрдых частиц. А.С. СССР № 1012098.
7. Журавлëв В.А. Прибор и методика для изучения процессов взаимодействия твёрдых частиц с жидкостями и газами. // Вестн. КузГТУ. 2003. № 1. С. 78–79.

□ Авторы статьи:

Журавлев  
Владимир Александрович  
- канд. техн. наук, доц. каф. технологии основного органического синтеза

Ушаков  
Геннадий Викторович  
- канд. техн. наук, доц. каф. химической технологии твердого топлива и экологии

**УДК 662.933.1; 662.612.321/322**

**Ю.О. Афанасьев, П.Т. Петрик, В.В. Устьянцев, Г.С. Пермякова**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГРАВИТАЦИОННО-РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ

Данная работа проводилась в рамках проблемы энергосберегающих технологий сжигания твердого топлива из низкокачественных и высокозольных углей, а также внедрения технологий сжигания комбинированных видов топлива.

Основным конструктивным критерием топки, предназначенной для сжигания низкокачественных и высокозольных углей, является обеспечение длительного времени пребывания частиц топлива в камере горения. Этому требованию полностью удовлетворяют топки циклонного типа.

Циклонные топки характеризуются следующими параметрами [1]:

1) длительное время пребывания, которое зависит от параметра закрутки  $S$  и длины камеры  $L$ ;

2) наличие тонкой кольцевой зоны рециркуляции, образующейся в потоке вблизи стенок, которая может быть использована для улучшения ста-

билизации пламени;

3) при высоких параметрах закрутки  $S$  топливно-воздушная смесь подвергается действию высокого центробежного ускорения, что сопровождается значительным повышением скорости распространения пламени;

4) в циклонной камере можно получить достаточно высокую эффективность сепарации частиц;

5) циклонные камеры могут быть объединены в многоступенчатую топку, в которой поток, подобный потоку из вихревой горелки, используется в процессе дожигания, обеспечивающем полное сгорание топлива.

Кроме того, циклонные топки обладают следующими преимуществами [1]:

1) отличное перемешивание топлива и окислителя;

2) тепловыделение концентрируется в умень-

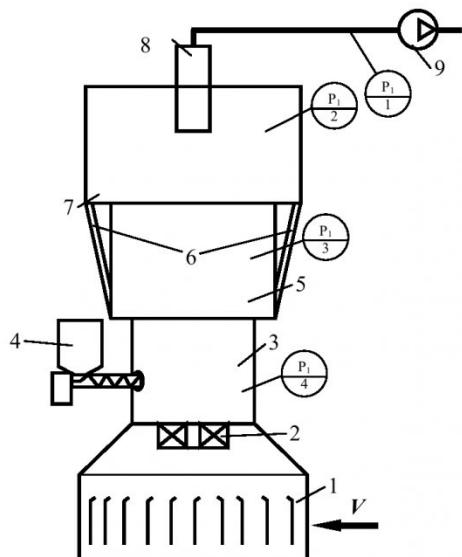


Рис.1. Схема экспериментального стенда:  
1 – закручивающее устройство, 2 – импеллер,  
3 – первая ступень, 4 – дозатор угольной пыли,  
5 – вторая ступень, 6 – каналы рециркуляции,  
7 – третья ступень, 8 – выхлопная труба,  
9 – центробежный компрессор

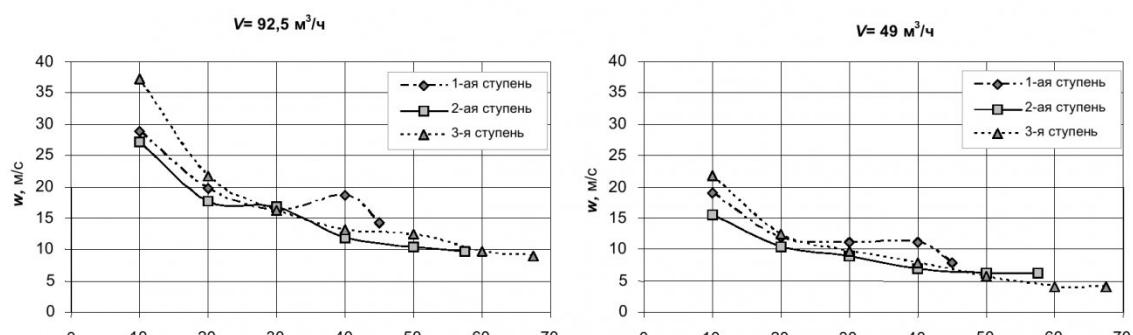


Рис.2. Профили окружной скорости  $w$  по радиусу ступеней  $r$   
при  $R_1 = 50\text{мм}$ ,  $R_2 = 62,5\text{мм}$ ,  $R_3 = 72,5\text{мм}$

- шенном объеме (высокая теплонапряженность);  
3) работа при малом избытке воздуха;  
4) высокий уровень температуры при подаче низкокалорийных топлив;  
5) возможность сжигания частиц диаметром вплоть до 5 мм.

С учетом вышеизложенного, для исследования гидродинамических режимов (в изотермических условиях) была предложена конструкция гравитационно-рециркуляционной вихревой топки (ГРВТ) циклонного типа. На рис.1 представлена схема установки для испытания первой конструкции ГРВТ. Опытный образец представляет собой цилиндрический трехступенчатый аппарат, выполненный из прозрачного органического стекла и снабженный закручивающим устройством для осевого подвода воздуха. С помощью закручивающего устройства 1 воздух приобретает вращательное движение. Импеллер 2 служит для дополнительной закрутки потока. Воздух, поступивший

в первую ступень аппарата 3 ( $D_1 = 100 \text{ мм}$ ;  $L_1 = 78 \text{ мм}$ ), смешивается с угольной пылью 4 и сообщает частицам топлива вращательное движение. Под действием центробежных сил происходит сепарация частиц по полкам ступеней устройства. Мелкая пыль циркулирует по стенкам и полке третьей ступени 7 ( $D_3 = 145 \text{ мм}$ ;  $L_3 = 85 \text{ мм}$ ) устройства. Вторая ступень 5 ( $D_2 = 125 \text{ мм}$ ;  $L_2 = 78 \text{ мм}$ ) содержит каналы рециркуляции 6 ( $d_k = 12 \text{ мм}$ ), по которым пылеобразное топливо с полки третьей ступени поступает на полку второй ступени. При определенном расходе воздуха на полках устройства пыль приобретает вращательное движение в виде тора. Такое движение частиц пыли топлива способствует лучшему перемешиванию с воздухом (окислителем). Кроме того, в центральной области второй и третьей ступени образуется центральная рециркуляционная зона, способствующая стабилизации пламени. Таким образом, при оптимальных размерах аппарата и расходе воздуха в топке образуется ряд зон рециркуляции, основная из которых – центральная – образуется в области второй и третьей ступени топки за счет каналов рециркуляции. Также на полках ступеней существуют зоны, в которых за счет эффекта сепарации циркулируют частицы определенного

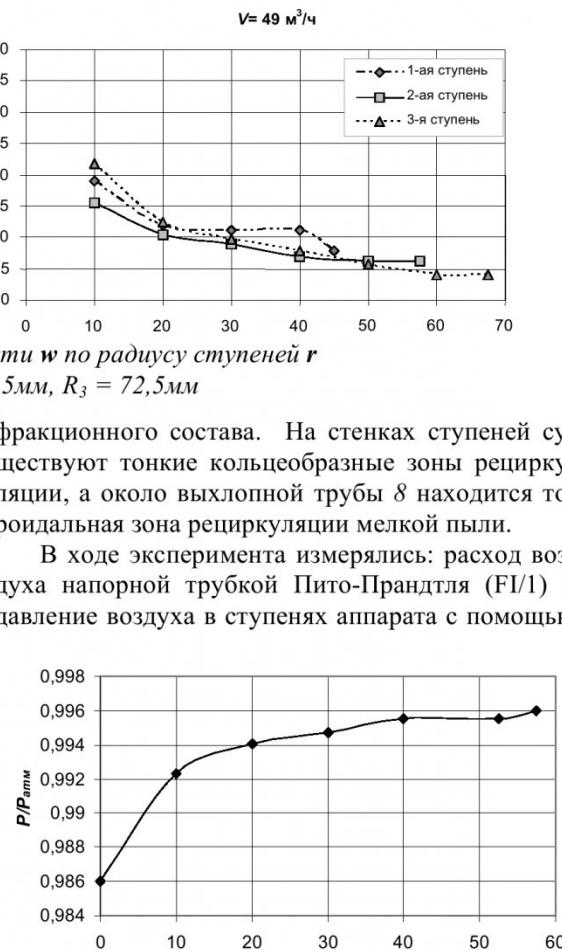


Рис.3 .Распределение статического давления  
по сечению второй ступени аппарата

У-образных спиртовых манометров (PI/2-4). В ступенях аппарата миниатюрной трубкой Пито-Прандтля проводились измерения локальной окружной скорости и тонким зондом - распределение статического давления по сечению аппарата. Опыты проводились в изотермических условиях при  $t = 23^{\circ}\text{C}$ . Расход воздуха изменялся от 33 до  $92,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствовало осевой скорости в первой ступени исследуемого аппарата  $u = 1,2 \div 3,3 \text{ м/с}$ . Для характерных гидродинамических режимов измерялись профили окружной скорости, которые представлены на рис.2.

Здесь  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – радиусы первой, второй и третьей ступени соответственно.

По полученным значениям окружной скорости был определен параметр закрутки  $S^*$  в первой ступени, согласно рекомендациям [1]:

$$S_1^* = \frac{G_O}{D_I G_D} = \frac{\rho \cdot w_1 u_1 r_1}{D_I \cdot \rho \cdot w_1 u_1} = \frac{r_1}{D_I} = \frac{0.045}{0.1} = 0.45 \quad (1)$$

где  $G_O$  – осевая компонента потока момента количества движения;

$G_D$  – осевая компонента потока количества движения;

$w_1$  – окружная скорость, измеренная на расстоянии  $r_1 = 0,045 \text{ м}$ ;

$u_1$  – осевая скорость, определенная по площади поперечного сечения первой ступени;  $D_I$  – диаметр первой ступени.

На рис.3 показано распределение статического давления по сечению второй ступени аппарата.

Наблюдения за потоками пыли в первом опытном образце показали, что циркуляция пыли на полках ступеней аппарата возникала только при больших расходах воздуха ( $V = 92,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). При уменьшении расхода воздуха происходило осаждение частиц на полках устройства, в первую очередь на полке третьей ступени, образуя неподвижный слой пыли.

Опытные данные по измерениям окружных скоростей и статического давления (рис.2 и 3) позволяют сделать следующие выводы.

- В центральной осевой области аппарата при больших расходах воздуха образуется концентрированный вихрь, препятствующий возникновению центральной рециркуляционной зоны, из-за которого происходит повышенный унос мелкой фракции пыли.

- На полке третьей ступени аппарата появляется застойная зона, заполненная вихрями, в результате чего образуется отрицательный перепад давлений между полками второй и третьей ступени, препятствующий рециркуляции пыли с полки третьей ступени на полку второй ступени по каналам рециркуляции.

На основании результатов испытаний гидродинамики течения в опытном образце были проведены следующие работы по модернизации ап-

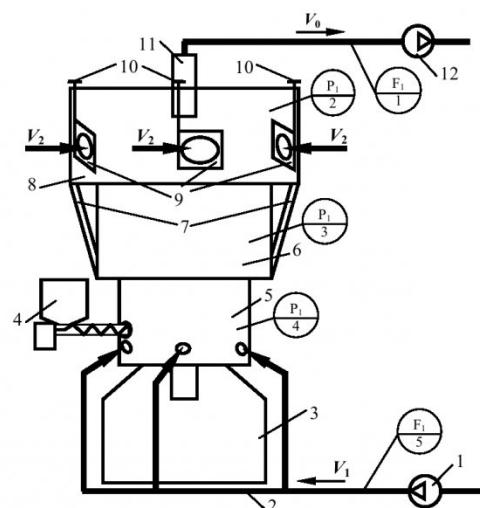
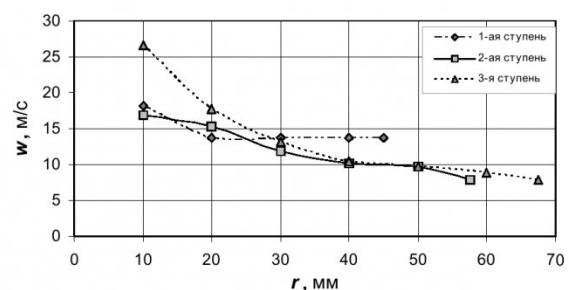


Рис.4. Схема экспериментального стенда:  
1 – вспомогательный компрессор, 2 – коллектор, 3 – сборник пыли, 4 – дозатор пыли,  
5 – первая ступень, 6 – вторая ступень, 7 –  
каналы рециркуляции, 8 – третья ступень, 9  
– заслонки верхнего подвода воздуха, 10 –  
ручки регуляторов положения заслонок,  
11 – выхлопная труба, 12 – центробежный  
компрессор

парата:

- для увеличения параметра закрутки осевой ввод воздуха заменен тангенциальным подводом через три канала в первой ступени аппарата;
- для предотвращения образования на полке

$$V_o = 56 \text{ м}^3/\text{ч}; V_1/V_2 = 1,62; S = 11$$



$$V_o = 42,4 \text{ м}^3/\text{ч}; V_1/V_2 = 3,5; S = 3,1$$

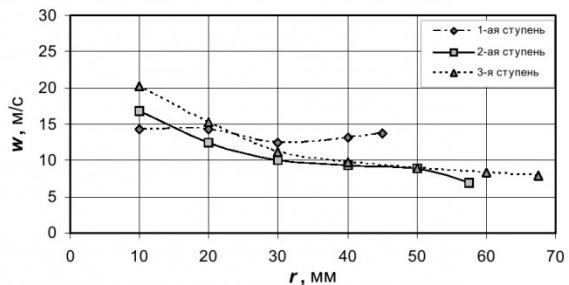


Рис.5. Профили окружной скорости  $w$  по радиусу ступеней  $r$  при  $R_1 = 50\text{мм}$ ,  $R_2 = 62,5\text{мм}$ ,  $R_3 = 72,5\text{мм}$  и параметрах закрутки  $S = 11$  и  $S = 3,1$ .

третьей ступени застойных зон, выполнен верхний тангенциальный ввод вторичного воздуха для подвода дополнительной энергии к потоку через четыре тангенциальных регулируемых канала.

Схема экспериментального стенда для испытания модернизированного аппарата представлена на рис.4.

При проведении второй стадии экспериментов измерялись следующие параметры. Как и на первой стадии измерялся общий расход воздуха ( $F_1/1$ ) напорной трубкой Пито-Прандтля, а давление в ступенях аппарата ( $P_1/2-4$ ) - U-образными спиртовыми манометрами. Кроме этого проводились измерения параметров первичного воздуха в коллекторе 2 напорной трубкой Пито-Прандтля. Опыты проводились следующим образом.

Включался основной 12, а затем вспомогательный 1 компрессоры и задавался общий расход воздуха и расход воздуха, подаваемого на первую ступень аппарата. Затем включался дозатор пыли 4 и производились измерения и визуальные наблюдения за циркуляцией пыли в аппарате. С помощью регулируемых заслонок 9, 10 изменялся расход вторичного воздуха  $V_2$  и параметр закрутки  $S$  вторичного воздуха. Конструкция верхнего ввода воздуха позволяла заслонками изменять угол ввода  $\varphi$  от  $67^\circ$  до  $88^\circ$ . Параметр закрутки потока определялся по формуле:

$$S = \frac{2}{3} \operatorname{tg} \varphi , \quad (2)$$

при этом параметр закрутки  $S_2$  изменялся от 1,5 до 19. Угол закрутки первичного воздуха не регулируется и равен  $58,5^\circ$ , что соответствует  $S_1 = 1,1$ .

Был проведен ряд опытов для определения оптимального режима, в котором существует рециркуляция пыли в центральной области, и не слеживается пыль по полкам аппарата. На рис.5 для этих оптимальных режимов работы аппарата приведе-

ны результаты измерений локальной скорости по сечению аппарата миниатюрной трубкой Пито-Прандтля.

Для данных оптимальных режимов работы аппарата визуальные наблюдения показали существование устойчивой центральной рециркуляционной зоны в области второй и третьей ступеней модернизированного опытного образца. Благодаря верхнему подводу вторичного воздуха образование рециркуляционных зон происходит при значительно меньших расходах воздуха, а изменение расхода и параметра закрутки вторичного воздуха с помощью заслонок позволяет отрегулировать оптимальный режим горения в топке. Распределение давлений между полками третьей и второй ступеней позволило получить устойчивую рециркуляцию пыли по каналам 7, что подтвердили визуальные наблюдения. Опыты, проведенные при различных фракционных составах угольной пыли, подтвердили наличие эффекта сепарации частиц пыли по ступеням аппарата.

На основании экспериментальных данных, полученных на опытном образце, и по рекомендациям [1] была разработана пилотная полупромышленная гравитационно-рециркуляционная вихревая топка циклонного типа.

Процесс горения в циклонных камерах, как и в других топках, искажает гидродинамическую установку движения потоков пыли. Однако, результаты подобных исследований гидродинамики течения в циклонной камере сгорания показывают, что структура течения в циклоне в изотермических условиях и при горении обладает определенным подобием [2-4], и, как правило, результаты, полученные в изотермических условиях, можно с достаточной точностью переносить на те случаи, когда имеет место горение топлива [5-6].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гупта А.К., Лили Д.Г., Сайред Н. Закрученные потоки. -М. :Мир, 1987. 590с.
- Schmidt K.R. V.D.J. // Berichte. 1970.V.146. P.90.
- Балуев Е.Д., Тоянкин Ю.В. Исследование аэродинамической структуры газового потока в циклонной камере // Теплоэнергетика. 1967. №2. с.63-.
- Кацельсон Б.Д., Богданов Л.А. Аэродинамические характеристики вертикальной циклонной топки с верхним выводом газа // Теплоэнергетика. 1970. №4. с.54-.
- Калишевский Л.Л., Ганчев Б.Г. Исследование процесса горения в горизонтальной циклонной топке с жидким шлакоудалением // Теплоэнергетика. 1965. №6. с.75-.
- Мансуров В.И., Кураев Ю.Ф., Маршак Ю.Л., Сучков С.И. Исследование сжигания бурых углей в вертикальных циклонных предтопках с тангенциальным вводом топлива и воздуха // Теплоэнергетика. 1970. №10. с.37-.

□ Авторы статьи:

Афанасьев  
Юрий Олегович  
– канд. техн. наук, доц.  
каф. процессов, машин и  
аппаратов химических  
производств

Петрик  
Павел Трофимович  
– докт.техн. наук, проф.  
зав. каф.процессов, машин  
и аппаратов химических  
производств

Устянцев  
Владимир Васильевич  
– ведущий инженер-  
технолог лаборатории  
проблем энергосбережения  
Кемеровского научного  
центра

Пермякова  
Галина Сергеевна  
– ст. преп.каф. процессов,  
машин и аппаратов хими-  
ческих производств.