

УДК 622.61; 662.93

П.Т. Петрик, Ю.О. Афанасьев, А.Р.Богомолов, Г.С. Козлова, П.В. Дадонов

## ГРАВИТАЦИОННО-РЕЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ВИХРЕВАЯ ТОПКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Гравитационно-рециркуляционная вихревая топка (ГРВТ), предназначенная для работы на высокозольном твердом топливе, была разработана и изготовлена по программе «Энергосбережение СО РАН» [1]. При проектировании аппарата ГРВТ был использован принцип работы циклонного сепаратора – классификатора измельченного твердого материала. Эти особенности топки ГРВТ позволяют организовать оптимальный процесс горения топлива при минимальных выбросах токсичных веществ в атмосферу.

Перед изготовлением полупромышленного образца были проведены исследования аэродинамики движения измельченного угля на «холодной» прозрачной модели ГРВТ [2]. Были определены скорости первичного и вторичного воздуха, при которых было отмечено существование устойчивых зон рециркуляции топлива в потоке воздуха.

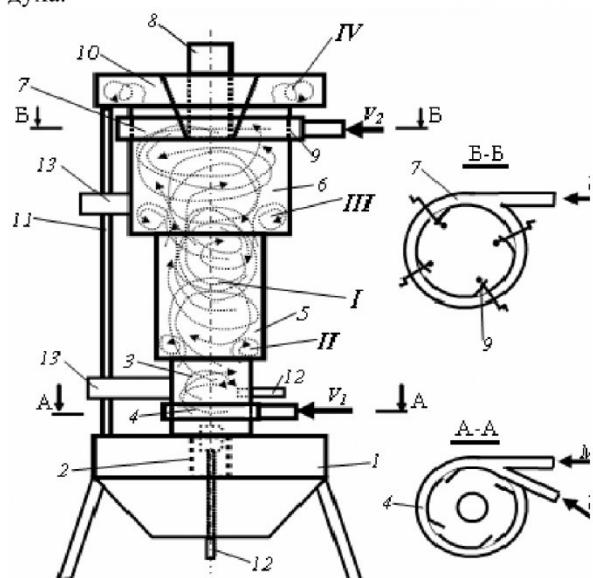


Рис.1. Схема ГРВТ и траектории частиц топлива в потоке воздуха:

I – центральная область рециркуляции топлива, II, III – торOIDальные зоны движения топлива на полках ступеней, IV - торOIDальная зона движения мелких частиц топлива и золы. 1 – бункер для шлака и золы, 2 – труба для отвода шлака, 3 – первая ступень, 4 – канал подвода первичного воздуха и топлива, 5 – вторая ступень, 6 – третья ступень, 7 – канал подвода вторичного воздуха, 8 – выхлопная труба, 9 – заслонки, 10 – четвертая ступень, 11 – каналы отвода золы, 12 – газовые горелки, 13 – смотровые окна.

На рис.1 показана схема изготовленной полу-промышленной топки ГРВТ и траектории частиц

топлива в объеме этого аппарата. Топливо и первичный воздух подают в первую ступень 3 ( $D_1 = 200$  мм;  $L_1 = 240$  мм), через колышевой канал перемешивания топлива и окислителя 4 (сечение A-A). В колышевом канале топливо расходом  $M$  смешивается с первичным воздухом расходом  $V_1$  и тангенциально поступает в камеру сгорания первой ступени через прямоугольные сопла. Первая ступень содержит две горелки 12 для разогрева ГРВТ в начальном процессе розжига и «подсветки» при работе. Размер второй ступени ГРВТ 5 увеличен относительно первой ( $D_2 = 260$  мм;  $L_2 = 330$  мм), а третья ступень 6 ( $D_3 = 360$  мм;  $L_3 = 370$  мм) снабжена тангенциальными регулируемыми каналами подвода вторичного воздуха (рис.1. сечение Б-Б). Параметр закрутки вторичного воздуха определяется положением заслонок 9. Верхняя, четвертая ступень топки 10 ( $D_4 = 500$  мм;  $L_2 = 100$  мм) предусмотрена для улавливания золы. При работе ГРВТ происходит разделение частиц топлива по размерам и массе и избирательное сгорание на полках ступеней аппарата, кроме того, в области второй и третьей ступени возникает центральная зона рециркуляции топлива I, подобная циркулирующему кипящему слою и обладающая всеми его преимуществами.

Изготовленная топка ГРВТ была размещена на территории завода полукоксования г. Ленинск-Кузнецкий. Схема экспериментальной установки ГРВТ, оснащенной необходимым оборудованием показана на рис. 2.

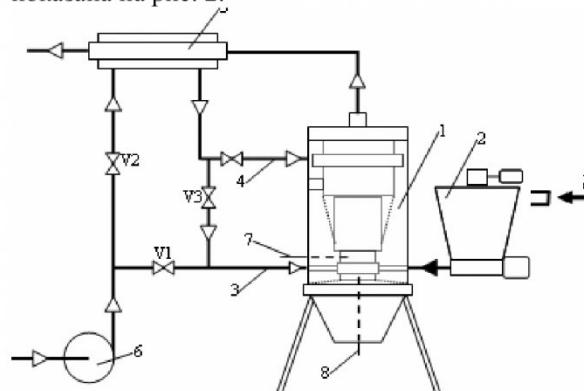


Рис.2. Схема установки ГРВТ:

1 – топка ГРВТ; 2 – дозатор топлива; 3 – труба подвода первичного воздуха; 4 – труба подвода вторичного воздуха; 5 – теплообменник; 6 – газодувка ВД-2; 7 – горелка для «подсветки»; 8 – основная горелка

Воздух в первую ступень топки ГРВТ 1 подается из напорного трубопровода газодувки 6 через регулятор расхода  $V_1$  по трубе 3. Подача вторич-

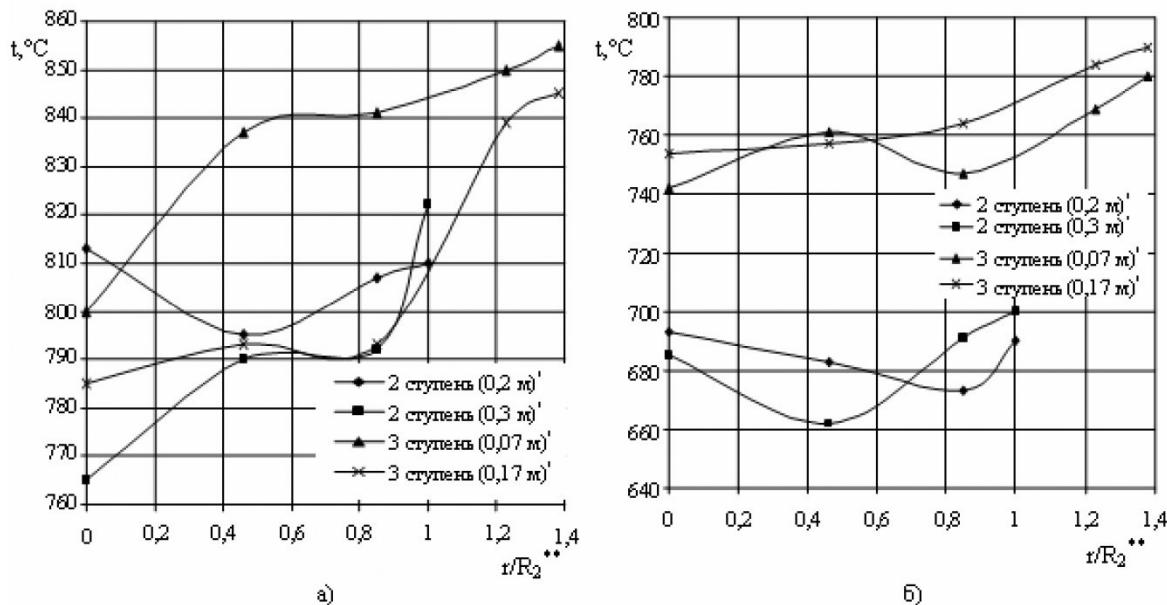


Рис.2. Профили температуры в поперечных сечениях ГРВТ при сжигании

а) угольной крошки фракции 0-1 мм, б) древесно-угольной смеси состава 1:10.

\* - высота, на которой измерялись температуры, отсчитывается от полки ступени,

\*\* - отношение текущего радиуса ступени к радиусу второй ступени.

ного воздуха осуществляется через регулятор расхода  $V2$ , теплообменник  $5$ , регулятор расхода  $V4$  по трубе  $4$ . Теплообменник  $5$  служит для подогрева вторичного воздуха. Для улучшения режима разжига установлена труба с регулятором расхода  $V3$ , с помощью которой подогретый воздух поступает в первую ступень топки. В этом случае регуляторы  $V1$  и  $V4$  закрыты. Заданный расход топлива  $M$  (рис. 1, сечение  $A-A$ ), подаваемого в ГРВТ, обеспечивает шnekовый дозатор  $2$ . Для разогрева

и розжига ГРВТ предусмотрены две пропановые горелки 7 и 8.

Экспериментальные исследования процессов горения проводили с использованием анализа результатов ранее проведенных опытов по разогреву и розжигу топки [3]. Разогрев ГРВТ проводили пропановыми горелками с общим расходом пропана 0,7-0,9 кг/ч до температуры объема на уровне второй ступени 700-750°C. Затем в топку подавали твердое топливо расходом  $M = 8-20$  кг/ч. В ка-

Таблица 1

Образец	$W^a, \%$	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$
Уголь	7,3	21,2	43,1
Опилки	6,0	1,0	81,3

Таблица 2

Компонент	Массовые доли, %	Массовые доли, %	Компонент	Массовые доли, %	Массовые доли, %
	1 образец	2 образец		1 образец	2 образец
O	47,4	61,6	Cl	0,31	0,20
Na	2,4	2,0	K	2,3	1,50
Mg	1,9	1,5	Ca	2,6	1,8
Al	12,5	9,6	Ti	0,3	0,2
Si	28,0	20,0	Fe	1,97	1,4
S	0,4	0,24			

Таблица 3

Температура первичного воздуха, °C	Температура вторичного воздуха, °C	Температура дымовых газов, °C	Расход топлива, кг/ч	Расход первичного воздуха, м³/ч	Расход вторичного воздуха, м³/ч	к.п.д.	Избыток воздуха α
219	172	575	18,5	395	0	0,72	1,5
220	205	560	18,5	266	190	0,83	2,1

чество измельченного твердого топлива использовали уголь марки Д фракцией 0-1 мм. При выходе установки ГРВТ в стационарный режим проводили измерения расходов и температур топлива, окислителя и дымовых газов, а также профили температур в объеме ГРВТ.

Для определения оптимальной температуры полного сгорания топлива, вначале исследовали низкотемпературный режим работы ГРВТ, для чего температуру в объеме топки поддерживали не более 900°C. Избыток воздуха составлял  $\alpha = 1,3-1,5$ .

На горение подавали только первичный воздух с температурой 210-215°C. Для этих условий были проведены измерения профилей температур при горении измельченного угля марки Д фракцией 0-1 мм и древесно-угольной смеси массовым расходом 18,8 кг/час и 12,8 кг/час.

Результаты измерений представлены на рис. 3.

Данные технического анализа топлива приведены в табл. 1.

Измерения профилей температур в объеме 2-й и 3-й ступени проводили изогнутой на нижнем конце ХА термопарой длиной 790 мм путем поворота вокруг основной оси и перемещения в осевом направлении. Профили температур на рис.3,а показывают, что распределение горения топлива (уголь марки Д фракцией 0-1 мм) по всему объему ГРВТ (исключая холодную воронку на первой ступени) и активная внутри топочной циркуляция газовых потоков выравнивают температурные и тепловые поля.

Перед приготовлением древесно-угольной смеси измерили влажность древесных опилок, которая составляла 10%. Топливная смесь содержала 9,1 % (масс.) древесных опилок фракцией 0-2,5мм.

Горение в ГРВТ древесно-угольной смеси сопровождалось снижением температуры во второй ступени аппарата (см. рис.3,б), что можно объяснить возникновением в её нижней части и на полке области газификации. В отличие от горения угольной крошки, в процессе которого образовывалась мелкая зола, горение древесно-угольной смеси сопровождалось появлением кусков шлака-друза в бункере[4].

Результаты элементного анализа методом обратного рассеяния электронов двух кусков шлака, сведенные в табл.2, подтвердили полноту выгорания углерода. Образование шлака можно связать с наличием в его составе элементов-плавней (K, Na), попадающих из древесных остатков.

По плану исследований были проведены опыты по сжиганию измельченного высокозольного угля марки ДГОК ( $A^p = 35\%$ ) при подаче только первичного воздуха (в первую ступень) и при подаче дополнительного, вторичного воздуха в третью ступень реактора. Основные режимные параметры экспериментов сведены в табл.3.

На рис. 4,а показано распределение температур в поперечных сечениях ГРВТ с подачей только первичного воздуха. В конце опыта по количеству зольного остатка был измерен к.п.д. ГРВТ, который был невысок и составлял 0,72, хотя температура горения на уровне третьей ступени составляла порядка 1000°C.

На рис. 4, б показано распределение температур в поперечных сечениях ГРВТ с подачей вторичного воздуха. При некотором снижении температуры в области третьей ступени, интенсивность горения в реакторе увеличилась, и к.п.д. ГРВТ составил 0,83. Вместе с тем увеличился унос золы с дымовыми газами.

Измерения состава дымовых газов газоанали-

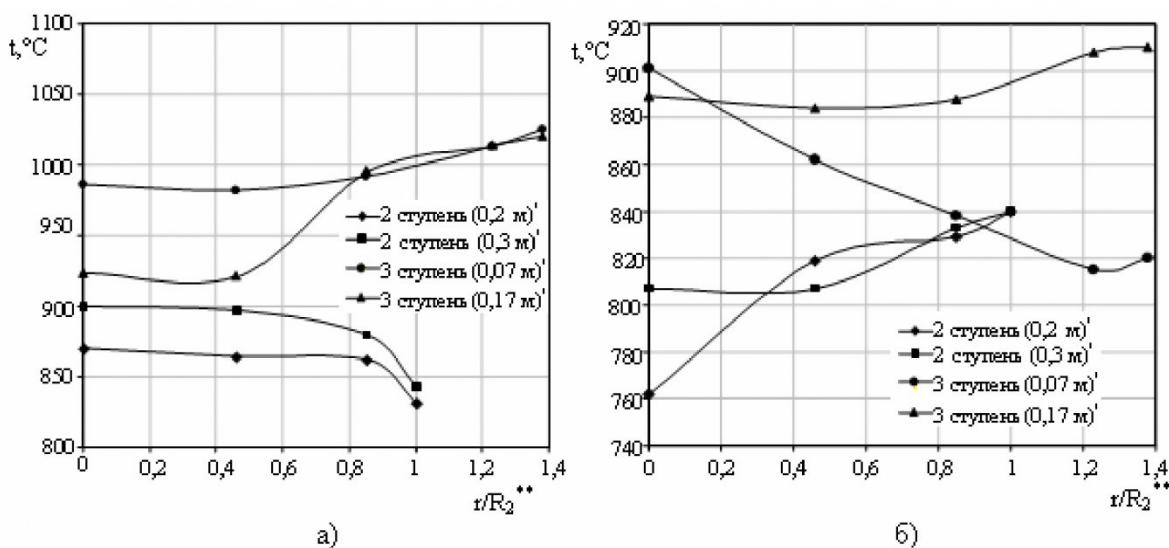


Рис. 4. Профили температуры в поперечных сечениях топки при сжигании высокозольного угля: а) – первичный воздух; б) – первичный и вторичный воздух.

\* - высота, на которой измерялись температуры, отсчитывается от полки ступени,

\*\* - отношение текущего радиуса ступени к радиусу второй ступени.

затором «Автотест» для характерных режимов показали содержание  $\text{CO} \sim 0,01\%$ ,  $\text{CO}_2 = 9-10\%$  и  $\text{O}_2 = 5-6\%$ .

Для установления причины малоэффективной работы топки была проведена серия аэродинамических опытов, в которых визуально и с помощью видеосъемки изучалось движение потоков угольной крошки без горения. Для этого была изготовлена верхняя крышка из прозрачного органического стекла, которую установили вместо стальной верхней крышки ГРВТ. Было сделано необходимое освещение внутреннего объема аппарата, не изменяющее аэродинамику движения угольных частиц.

Наблюдения показали, что начальная закрутка ( $S = 3,4$ ) и скорость воздушно угольной смеси недостаточна для подъема крупных угольных частиц и часть их падает сразу в бункер золы.

Кроме того, при подаче только первичного воздуха (в составе воздушно-угольной смеси) часть крупных частиц топлива оседает на полках второй и третьей ступени. При подаче вторичного воздуха в соотношении  $V_1/V_2 = 0,4-0,5$  все топливо циркулирует в области второй и третьей ступе-

ни и не осаждается на полках.

Была произведена реконструкция первой ступени ГРВТ. Лопатки каналов тангенциального ввода воздушно-угольной смеси в первой ступени были подогнуты на 5мм (10мм ширина исходного канала) с целью увеличения параметра закрутки ( $S = 7,6$ ) и входной скорости смеси (в два раза). Это позволило предотвратить падение крупных частиц топлива на входе в аппарат в бункер, что подтвердили визуальные опыты.

В заключение необходимо отметить, что здесь приведены первые опыты испытания нового аппарата – гравитационно-рециркуляционной вихревой топки. Опыты по сжиганию высокозольных топлив и возобновляемых источников энергии (биомассы) будут продолжаться и возможно дальнейшее изменение конструкции топки ГРВТ.

Исследования процессов горения измельченного твердого топлива в гравитационно-рециркуляционной вихревой топке (другое название высокотемпературный циклонный реактор) проводятся при поддержке гранта РФФИ №-07-08-96030 р\_урал\_a

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Ю. О. Разработка конструкции гравитационно-рециркуляционной вихревой топки / Ю.О. Афанасьев, П.Т. Петрик, Г.С. Пермякова, В.С. Кочетков // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2006. – №6.2. – С. 120-122.
2. Афанасьев, Ю.О. Исследование гидродинамики гравитационно-рециркуляционной вихревой топки (ГРВТ) / Ю.О. Афанасьев, П.Т. Петрик, Г.С. Пермякова, В.В. Устьянцев // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2006. – № 2. – С. 62-67.
3. Петрик, П. Т. Отработка режимов розжига высокотемпературного циклонного реактора / П.Т. Петрик, Ю.О. Афанасьев, А.Р. Богомолов, Г.С. Козлова // Сб. тр. X Межд. н-практ. конференции: химия – XXI век: новые технологии, новые продукты. – Кемерово, 2008. – С. 25-28.
4. Афанасьев Ю.О. Исследование горения измельченного топлива в высокотемпературном циклонном реакторе / Афанасьев Ю.О., Богомолов А.Р., Петрик П.Т., Козлова Г.С..// Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2008. Материалы XII Межд. н-практ. конференции, – Кемерово, 2008. – С.425-428.

□ Авторы статьи:

Афанасьев  
Юрий Олегович  
– канд. техн. наук, доцент каф.  
«Процессы, машины и аппараты  
химических производств»  
КузГТУ.  
Тел.3842-58-10-36

Петрик  
Павел Трофимович  
– доктор техн. наук, проф., зав. кафедрой «Процессы, машины и аппараты химических производств»  
КузГТУ.  
Тел.3842-58-10-36

Богомолов  
Александр Романович  
– канд. техн. наук, доцент каф.  
«Процессы, машины и аппараты химических производств»  
КузГТУ  
Тел.3842-58-10-36

Козлова  
Галина Сергеевна  
– старший преподаватель каф.  
«Процессы, машины и аппараты химических производств»  
КузГТУ.  
Тел.3842-58-10-36

Дадонов  
Пётр Васильевич  
– канд. техн. наук, доцент каф.  
«Процессы, машины и аппараты химических производств»  
КузГТУ.  
Тел.3842-58-10-36