УДК 662.936

А. Т. Шаймуллин, А. А. Макаров, А. Н. Грачев,
И. Я. Сафиуллин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УГЛЕВЫЖИГАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Ключевые слова: пиролиз, углевыжигательные печи.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований температурного поля в горизонтальных цилиндрических углевыжигательных печах периодического действия. Показано распределение температур по высоте и ширине пиролизной камеры, а так же представлен возможный способ интенсификации процесса.

Key words: pyrolysis, charcoal kiln.

The paper presents the experimental research of temperature distribution in a horizontal cylindrical charcoal kiln. The paper shows the temperature distribution on the height and width of the pyrolysis chamber, and also a possible way to intensify the process.

В связи с низким уровнем освоения расчетной лесосеки в течение длительного времени, в лесах Российской Федерации накоплены значительные объемы перестойной, низкотоварной древесины [1]. Данное сырье оказалось не востребованным лесопильными предприятиями в связи с низким выходом полезной продукции и высоким уровнем затрат при переработке и заготовке. Кроме того, в связи с газификацией сельских поселений, спрос на дровяную древесину значительно упал, что также усугубляет положение по использованию низкотоварной древесины. В связи с этим, при лесозаготовках и разработках лесных участков, доля низкотоварной древесины возрастает. Данное обстоятельство заставляет лесозаготовителей решать вопрос утилизации низкотоварной древесины в отсутствии устойчивого спроса [2].

Одним из интересных направлений использования низкотоварной древесины является ее переработка в древесный уголь. Относительно низкие капитальные вложения, доступность сырья и высокая востребованность древесного угля на рынке, позволяют стабильно развиваться даже предприятиям с малой производительностью (до 30 тонн в месяц) [3].

Одним из распространенных способов углежжения является получение угля в горизонтальных углевыжигательных пиролизных печах периодического действия. Достоинством данного способа получения древесного угля является дешевизна необходимого оборудования и его мобильность, что позволяет перемещать оборудование с одной лесосеки на другую.

Однако, у представленного способа имеется и ряд недостатков. Во-первых, это низкий выход кондиционного продукта – древесного угля, а так же его нестабильный гранулометрический состав, присутствие значительной доли, так называемой угольной «пыли». Во-вторых, длительность производственного цикла, который может длиться от 2 до 4 суток, в зависимости от свойств исходного сырья и времени года. В-третьих, низкая степень механизации, что делает процесс получения древесного угля в горизонтальных углевыжигательных пиролизных печах периодического действия довольно трудоемким. В-четвертых, образующиеся при пиролизе вредные выбросы, которые загрязняют окружающую среду из-за отсутствия в таких печах системы дожига пиролизных газов.

Учитывая большие объемы низкотоварной древесины, а также все вышеперечисленные недостатки существующих печей, для эффективной ее переработки в древесный уголь, необходимой видится задача разработки эффективной углевыжигательной установки малой производительности.

Процесс пиролиза в камерах периодического действия можно разделить на стадии прогрева, сушки, термического разложения, охлаждения и стабилизации угля. Причем эффективность процесса на всех этапах во многом зависит от гидродинамических характеристик аппарата и равномерности распределения температур в технологической камере.

С целью оценки лимитирующих факторов процесса пиролиза были проведены исследования распределения температур в горизонтальной цилиндрической камере. Исследования проводись на цилиндрической углевыжигательной установке, схема которой представлена на рис.1.

Установка состоит из цилиндрической камеры (1), диаметром 2,2 м, в нижнюю часть которой вмонтирована топка (2) и жаровая труба (3). В цилиндрической камере (1) расположены клапан (4), газоотводные трубы (5), дверь для загрузки и выгрузки сырья и готового продукта (6).

Установка работает следующим образом: в камеру (1) загружается сырье и растапливается топка. Начинается процесс сушки с выделением паров влаги, которые удаляются через клапан (4) в верхней части камеры.

По мере завершения процесса сушки и повышении температуры в камере (1) начинается процесс термического разложения с образованием парогазовой смеси. При этом клапан (4) закрывается, а парогазовая смесь проходит через

газоотводные трубы (5). После окончания процесса термического разложения камера при закрытых газоотводных трубах (5) и открытой двери топки, подвергается выдержке с целью охлаждения и стабилизации древесного угля до температуры окружающей среды.

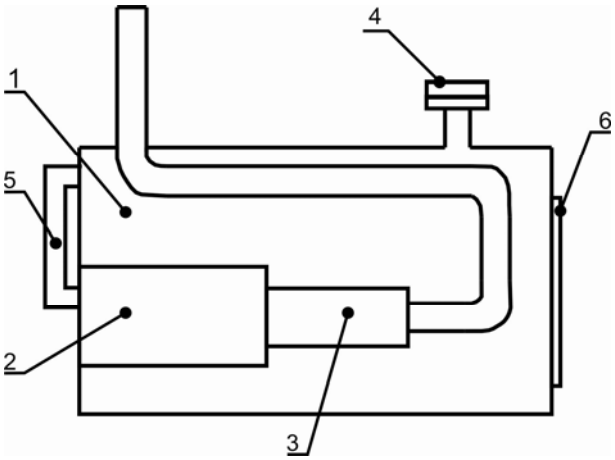


Рис. 1 - Схема горизонтальной углевыжигательной печи периодического действия

С целью исследования температурного поля в камеру пиролиза были установлены термоэлектрические преобразователи. Схема их установки проиллюстрирована на рис. 2.

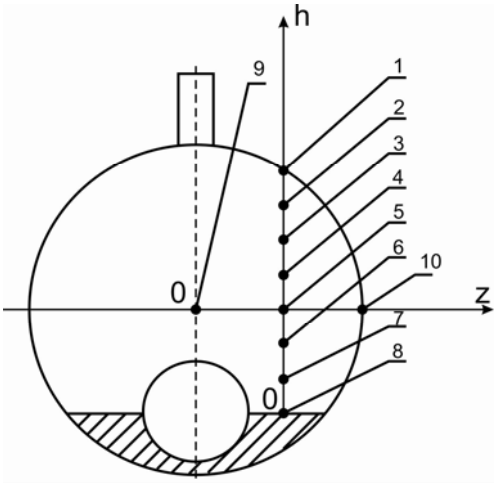


Рис. 2 - Схема установки термоэлектрических преобразователей в пиролизной камере

Экспериментальный тестовый цикл получения древесного угля осуществлялся на березовом сырье, подготовленном в соответствии с ГОСТ 24260-80 «Сырье древесное для пиролиза и углежжения» [4]. Укладка сырья осуществлялась внавал, эффективная емкость камеры составила 5,7 м^3, температура окружающей среды в ходе эксперимента составляла 15 ^{0}С.

В ходе проведения исследований показания термоэлектрических преобразователей фиксировались с интервалом в 1 час на протяжении всего технологического цикла. Полученные данные приведены в виде графических зависимостей на рис. 3,4 и 5.

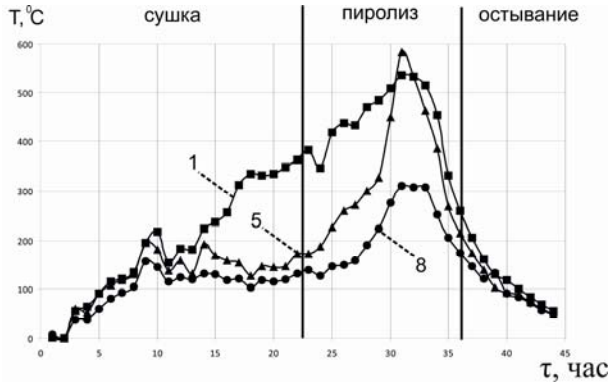


Рис. 3 - Зависимость распределения температур в пиролизной камере в процессе термической переработки (номер графика соответствует номеру термоэлектрического преобразователя на рис. 2)

На рис 3 представлены температурные зависимости, полученные в ходе тестового технологического цикла. Как видно из представленных зависимостей технологический процесс можно разделить на 3 стадии: сушка, пиролиз, остывание. Первой и наиболее продолжительной стадией является сушка, которая протекает около 23 часов, 52% времени технологического цикла, до появления пиролизных газов. Затем следует пиролиз около 13 часов и остывание 8 часов. На основании полученных температурных кривых были составлены зависимости распределения температуры по высоте и ширине пиролизной камеры, которые представлены на рис. 4 и 5. Данные зависимости показывают распределение температуры в наиболее характерные моменты в каждой конкретной стадии: сушки, пиролиза и остывании.

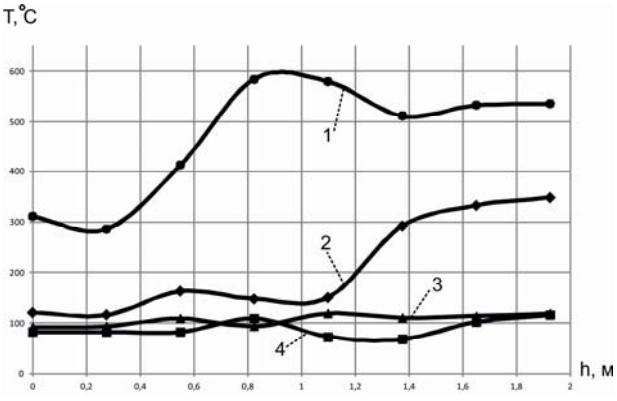


Рис. 4 - Графики распределения температур, расположенных по высоте пиролизной камеры: 1 – 30 часов (пиролиз), 2 – 20 часов (сушка), 3 - 39 часов (остывание), 4 – 5 часов (сушка)

Температура в пиролизной камере по высоте распределяется неравномерно, а с большими перепадами на протяжении всего цикла. Следует отметить, что на стадии сушки имеет место

значительный градиент температур по высоте камеры. В верхней части пиролизной камеры, в конце сушки, температура достигает 370 ^{0}C, а в нижней составляет 120 ^{0}C, т.е. сырье еще сушится. Таким образом, в верхней части камеры на стадии сушки идет активное термическое разложение. В результате такой неравномерности распределения температуры происходит конденсация паров термического разложения и водяных паров, смешение пара с пиролизными газами, что снижает их калорийность и увеличивает продолжительность топки печи. Таким образом, сушка в камере пиролиза является наиболее продолжительной стадией процесса и требует сжигания дополнительного топлива, что снижает эффективность процесса.

На стадии термического разложения, которая занимает 29 % времени технологического цикла, происходит бурное выделение пиролизных газов. На данной стадии процесса температура повышается до 520 ^{0}C. Однако, следует отметить, что различие температур в верхней и нижней частях пиролизной камеры остается, хотя в целом температурный уровень процесса повышается.

Качество готовой продукции из-за сильного градиента температуры по высоте камеры низкое и нестабильное. В верхней части камеры уголь перекаленный, а в нижней части не соответствует требованиям ГОСТ 7657-84 [5]. Готовая продукция, которая выгружается в виде головней и угля, который не соответствует ГОСТ 7657-84 составляет 46% от массы конечной выгружаемой продукции, что говорит о низкой эффективности всего процесса.

Не смотря на, естественную конвекцию, температура в средней части камеры на стадии пиролиза, за счет экзотермического разогрева, становиться выше, чем в верхней части и достигает максимального значения в процессе – 580 ^{0}C.

Стадия охлаждения до температуры 50 ^{0}C длится около 8 часов за счет теплообмена через стенку топки с окружающей средой. Однако, следует отметить что на практике для стабилизации угля необходима продолжительность более суток. В противном случае уголь загорается при открывании печи. После стабилизации, как правило, пиролизную камеру можно разгерметизировать и вынимать готовый продукт.

Учитывая то, что стадии сушки и охлаждения составляют 71 % времени технологического цикла, для конструкции данного типа есть значительный резерв для интенсификации процесса.

На рис. 5 представлены изменения температур в процессе пиролиза по ширине углевыжигательной камеры. Из рис. 5 видно, что в процессе сушки наивысшая температура наблюдается над топкой, которая снижается ближе к периферии. На стадии пиролиза температура над топкой значительно ниже, чем температура в периферийных точках.

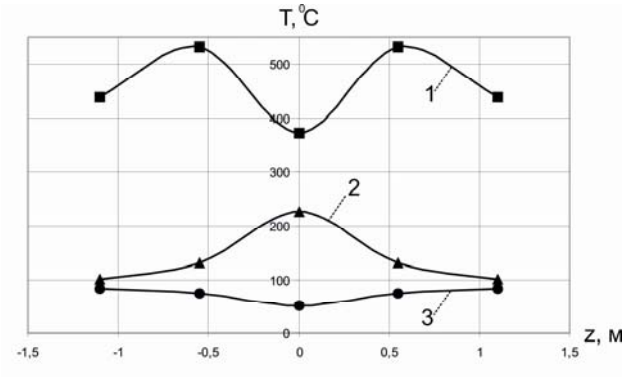


Рис. 5 - Зависимости распределения температур по ширине пиролизной камеры для различных стадий процесса: 1 - пиролиз, 2 - сушка, 3 - остывание

Это говорит о том, что над топкой термическое разложение завершилось, а в средних и периферийных участках наблюдается экзотермический разогрев. Зависимость на стадии охлаждения показывает, что уголь остывает от центра к краю пиролизной камеры за счет вентиляции топки.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что основным недостатком горизонтальных цилиндрических пиролизных камер является неравномерный нагрев сырья. Основной нагрев сырья происходит в верхней части всей пиролизной камеры и средней части на протяжённости топки. Данное обстоятельство как увеличивает производственный цикл установки, так и приводит к нестабильному и неудовлетворительному качеству готового продукта, 46 % готовой продукции составляет брак. Для устранения данного недостатка видится необходимым пересмотреть схему организации тепловых потоков в камере пиролиза для обеспечения стабильных условий ведения процесса.

Литература

1. С.А. Забелкин, А.Н. Грачёв, В.Н. Башкиров. *Вестник Казанского технологического университета*, **24**, 39-42 (2011).
2. А.А. Макаров, А.Н. Грачев, С.А. Забелкин, С.А. Пушкин, *Вестник Казанского технологического университета*, **13**, 177-180 (2013).
3. А.А. Макаров, А.Н. Грачев, Р.Г. Сафин, А.Т. Шаймуллин, *Вестник Казанского технологического университета*, **8**, 68-73 (2011).
4. ГОСТ 24260-80 «Сырье древесное для пиролиза и углежжения» Технические условия.
5. ГОСТ 7657-84. Уголь древесный. Технические условия.

© А. Т. Шаймуллин - асп. каф. химической технологии древесины КНИТУ, matvei2008@bk.ru; **А. А. Макаров –** канд. техн. наук, доц., докторант той же кафедры, smakarov86@gmail.com; **А. Н. Грачев –** д-р техн. наук, проф. той же кафедры, energolesprom@gmail.com; **И. Я. Сафиуллин –** магистрант той же кафедры.