

А.В. ШУШЛЯКОВ¹, Д.В. ШУШЛЯКОВ², В.В. ЧЕРНОКРЫЛЮК³

¹Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

²Харьковская национальная академия городского хозяйства

³Представитель компании Riello S.p.A. в СНГ.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ И ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА СЛОЕВЫМ СПОСОБОМ С ДВУМЯ ЗОНАМИ ПИРОЛИЗА В КОМБИНИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Охарактеризован способ слоевого сжигания топлива с двумя зонами пиролиза обеспечивающий повышение КПД ГТЭ за счет поступления в зону горения горючей высокотемпературной газовой смеси и разогретого кокса, что способствует увеличению скорости горения топлива и исключает химический и механический недожог.

Топливо сжигают слоевым, факельным и вихревым способами. При этом скорость и полнота сгорания топлива зависят от его вида, удельного содержания минеральных негорючих веществ, влажности, наличия кислорода и температуры. Эти факторы влияют на расход топлива, продолжительность (скорость) горения и на КПД генераторов тепловой энергии.

В настоящее время используются традиционные и не традиционные виды топлива, например, отходы переработки древесины, сельскохозяйственной продукции, производственные и коммунально-бытовые отходы. Характеристики некоторых видов топлива приведены в таблице 1.

Известно, что затраты энергии на извлечение влаги из любого вида топлива зависят от размеров кусков, пористости, структуры и, конечно, от влажности топлива. При этом энергия тратится на нагрев топлива, влаги и на испарение влаги. Влага в слое топлива может быть на поверхности частиц (кусков) в микропорах или в химически связанном состоянии, поэтому механизм и затраты энергии на извлечения влаги, а также скорость фронта влажности будут зависеть от характера распределения влаги.

Таблица 1. Характеристика разных видов топлива

№ пп	Вид топлива	Теплота сгорания МДж/м ³	Содержание серы, %	Содержание зола, %	КПД существующих генераторов тепловыр энергии, %
1	Каменный уголь	15.0-25.0	1-3	10-35	56,1
2	Опилки древесные	10	0	1,0	80,5 – 35,0 *
3	Щепа древесная	10	0	1,0	80,5
4	Гранулы торфяные	10	0	4,0 – 20,0	79,0
5	Гранулы из соломы	14,5	0,2	4,0	84,0
6	Гранулы древесные	17,5	0,1	1,0	86,0

35,0* - КПД сырых опилок.

Механизм испарения влаги с поверхности частиц для всех видов топлива одинаков. А испарение влаги из влажных дров с капиллярными каналами упорядоченной структуры существенно отличается от испарения влаги из пор переработанного топлива.

При сжигании дров поверхность поленьев нагревается в основном конвективным потоком. Тепло от поверхности поленьев к их середине передается за счет

теплопроводности. Влага, содержащаяся в поленьях дров, испаряется, а пар, преодолевая сопротивление капиллярных каналов, выводится по этим каналам на торцы поленьев. Если каналы имеют большое сопротивление, то давление пара в каналах повышается, что приводит к разрушению стенок между смежными каналами или образованию трещин в поленьях, через которые отводится пар. Таким образом, при сжигании дров фронт влажности может представлять собой границы условной поверхности с постоянной концентрацией влаги, внутри которой могут быть локальные очаги изменения влажности в отдельных кусках (поленьях) с градиентом влажности, направленным от периферии к середине куска (полена). Такой характер изменения концентрации влаги в слое топлива может привести к неравномерности сгорания топлива и к тому, что отдельные куски топлива могут не полностью сгорать из – за того, что влага в середине куска не успела испариться, либо температура внутри куска топлива не достигла температуры пиролиза.

В переработанном топливе, например, в щепе, пеллетах и др. пористость распределена практически равномерно по всей поверхности частиц, что обеспечивает равномерное извлечение влаги из слоя топлива с меньшими затратами энергии, а скорость распространения фронта влажности примерно одинаковая вдоль каждой координатной оси.

Скорость фронта температуры в слое топлива также зависит от вида и состава топлива, влажности, размеров и структуры его кусков, свойств топлива, интенсивности потока подводимой теплоты и других факторов.

В генераторах тепловой энергии с двумя зонами пиролиза и подачей горячего воздуха по схеме «сверху –вниз» образуются четыре зоны: первая зона пиролиза, зона сушки, вторая зона пиролиза и зона горения. Схема распределения зон в слое топлива показана на рис.1[1].

Горячий воздух с температурой выше температуры пиролиза данного вида топлива подается сверху на слой топлива.

В первой зоне пиролиза происходит нагрев топлива и влаги, испарение влаги и частичный пиролиз (газификация) топлива.

Во второй зоне (в зоне сушки) происходит удаление влаги из крупных частиц топлива. В нижней части зоны сушки происходит нагрев слоя топлива за счет теплопроводности. Тепло на нагрев поступает от слоя топлива второй зоны пиролиза, в которой температура топлива выше чем в зоне сушки.

Для расчета скорости фронта влажности и фронта температур в слое топлива будем принимать граничные условия, приведенные в работе[1]:

На верхней границе первой зоны пиролиза $\tau = 0; t = \text{Const}; x = 0; y = 0$. Здесь и далее: τ – время; t – температура; x, y – координаты.

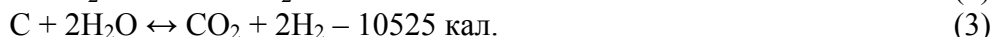
На нижней границе первой зоны пиролиза и на верхней границе зоны сушки $\tau = \tau_1$; $t \leq t_n$; $x = x_i$; $y = y_1$,
где t_n – температура пиролиза топлива;

На нижней границе зоны сушки и на верхней границе второй зоны пиролиза $\tau = \tau_2$; $t \geq t_n$; $x = x_i$; $y = y_2$.

На нижней границе второй зоны пиролиза и на верхней границе зоны горения $\tau = \tau_3$; $t \leq t_r$; $x = x_i$; $y = y_3$

На нижней границе зоны горения $\tau = \tau_4$; $t \geq t_r$; $x = x_i$; $y = y_4$,
где $I = 1, 2, 3$.

В зависимости от расхода и температуры дутьевого воздуха процесс взаимодействия углерода с кислородом в слое топлива может протекать по уравнениям, приведенным в работе[1], но так как температура слоя (первой зоны пиролиза) быстро снижается ниже 700°C , то уравнения реакций углерода с кислородом в основном будут протекать по уравнениям:



На нагрев топлива, влаги и испарение влаги, а также на протекание эндотермических реакций пиролиза (1)÷(3) затрачивается тепло, поэтому температура газовоздушного потока в зоне сушки понизится до 300 °С-350 °С. Тогда, в зоне сушки углерод с кислородом будет взаимодействовать по уравнениям:



Как видно из (4)-(5), реакции протекают с потерей теплоты и образованием СО. В нижней части зоны сушки температура топлива будет повышаться за счет теплопередачи тепла от более нагретых частиц топлива во второй зоне пиролиза. При более высокой температуре топлива $t \geq t_n$, реакция будет протекать с образованием СО₂ и поглощением тепла по уравнению (6).

Значения температуры во второй зоне пиролиза изменяются в пределах 400 °С – 450 °С < $t_{2\text{зп}}$ < 1000 °С – 1050 °С. При этом химические реакции углерода и его соединений будут протекать по уравнениям:



Реакция пиролиза будет протекать одновременно с реакцией горения продуктов пиролиза преимущественно с образованием СО₂ и выделением тепловой энергии. С учетом уравнения (9) можно утверждать, что при температуре более 1000 °С, в отличие от уравнения (1), реакция углерода «С» с кислородом (с образованием СО₂) может протекать с выделением тепловой энергии. В этой зоне происходит полное разделение частиц топлива на газообразные компоненты, кокс и несгораемые примеси (зола).

В зону горения поступают все продукты пиролиза топлива и образовавшиеся во второй зоне пиролиза продукты горения топлива. При температуре более 1050 °С - 1500 °С в зоне горения будут протекать обратимые реакции горения продуктов пиролиза и кокса с выделением тепловой энергии и частиц твердого углерода (сажи). В слое раскаленного кокса температура может быть 1500 °С - 1800 °С. В этом слое частицы твердого углерода снова превращаются в газообразный углерод. Химические реакции в зоне горения будут протекать по уравнениям:



На основании изложенного можно утверждать, что тепловая энергия, затраченная на подогрев дутьевого воздуха, расходуется на подготовку топлива (нагрев, сушку, пиролиз) для высокоэффективного сжигания без потерь за счет химического и механического недожега.

Очевидно, что скорость сгорания топлива и затраты тепловой энергии на подготовку топлива для сжигания слоевым способом с двумя зонами пиролиза будет зависеть от вида топлива и влажности, а также от температуры дутьевого воздуха. В качестве примера, рассмотрим процесс сгорания переработанного топлива – щепы древесины хвойных пород.

В качестве допущений будем считать, что топливо однородное, состав и влажность топлива, поступающего на горение, не изменяются.

При испарении влаги с поверхности частиц конвективным способом скорость тепло- и массообменного процесса можно рассчитать по формуле[1].

$$v_s = \frac{G_{вл}}{dS \cdot d\tau} = \beta(C'_п - C_п), \quad (13)$$

где v_s – скорость испарения влаги с поверхности частиц топлива;

$G_{вл}$ – количество испарившейся влаги;

S – площадь поверхности топлива;

τ – время испарения;

$C'_п, C_п$ – концентрация пара в пограничном слое частиц топлива и в газовой среде;

β – коэффициент массоотдачи.

Затраты тепловой энергии на испарение влаги из слоя топлива всегда больше скрытой теплоты парообразования, что обусловлено дополнительными затратами энергии на разрыв межмолекулярных связей воды, диффузию молекул пара, преодоление сопротивлений движению пара. Но при испарении влаги с поверхности частиц топлива затраты тепла на испарение влаги можно считать равными скрытой теплоте парообразования. Тогда зависимость плотности теплового потока и количества тепла, затраченного на испарение влаги в первой зоне пиролиза и в верхней части зоны сушки можно рассчитать по формуле:

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = \frac{dG_{вл}}{Sd\tau} \cdot r, \quad (14)$$

где Q – количество расходуемой теплоты;

r – скрытая теплота парообразования.

При повышении температуры топлива вблизи нижней зоны сушки необходимо учитывать увеличение интенсивности сушки за счет эффекта термодиффузии. С учетом термодиффузии уравнение скорости сушки топлива будет иметь вид:

$$v_c = -D\rho_v(\text{grad}C - \delta\text{grad}T), \quad (15)$$

где D – коэффициент диффузии паров воды;

ρ_v – плотность потока пара;

$\text{grad}C$ – градиент концентрации пара;

δ – коэффициент, учитывающий влияние бародиффузии;

$\text{grad}T$ – градиент температуры

При этом уравнение массопереноса при испарении влаги можно представить в следующем виде:

$$\frac{dC}{d\tau} = \text{div}(D^* \text{grad}C), \quad (16)$$

где D^* – коэффициент диффузии, зависящий только от влажности топлива.

Обозначим площадь топлива S , массу и теплоемкость сухой части топлива, соответственно, m_t и c_t , а массу и теплоемкость жидкости обозначим через $m_{ж}$ и $c_{ж}$. Тогда количество теплоты, необходимой для испарения влаги из топлива можно рассчитать по формулам:

$$q_{и} = (c_t m_t + c_{ж} m_{ж}) \frac{dT}{d\tau}. \quad (17)$$

Или

$$q_{и} = r \left(\frac{dm_{ж}}{d\tau} \right) = r \cdot m_t \left(\frac{dC}{d\tau} \right). \quad (18)$$

После преобразования (18) среднеинтегральный тепловой поток на поверхность топлива можно рассчитать по формуле:

$$\overline{q_s} = \rho_v R_v \cdot r \frac{dC}{d\tau} \left(1 + \frac{c_T}{r} \frac{dT}{dC} \right), \quad (19)$$

Или

$$\overline{q_s} = \rho_v R_v \cdot r \frac{dC}{d\tau} (1 + Rb), \quad (20)$$

где R_v – приведенный размер (высота) слоя топлива;

Rb – критерий Ребиндера;

$\frac{dT}{dC} = b$ – температурный коэффициент сушки;

$\frac{dC}{d\tau}$ – скорость сушки.

Как правило, значения критерия Ребиндера можно принимать $Rb \ll 1$, тогда скорость изменения среднеинтегрального значения влажности топлива можно представить в следующем виде:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{\overline{q_s}}{\rho_v \cdot R_v \cdot r}. \quad (21)$$

Из (21) приближенное значение скорости границы зоны испарения влаги будет иметь вид:

$$v_s = \frac{\overline{q_s}}{\rho_v \cdot R_v \cdot r}. \quad (22)$$

Или скорость перемещения границ зоны сушки можно представить в следующем виде:

$$v_s = \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (23)$$

где x - текущая координата границ сушки.

Величина среднеинтегрального значения потока теплоты к поверхности слоя топлива может иметь вид:

$$\overline{q_s} = c_m \cdot \rho_v \cdot R_v \left(\frac{d\theta}{d\tau} \right) + \gamma Ve^2 \left(\frac{dq_s}{dFo} \right), \quad (24)$$

где $Ve = \frac{\alpha}{R_v v_s}$ – критерий Верона;

$Fo = \frac{\alpha \tau}{R_v^2}$ – критерий Фурье.

При $Rb \ll 1$, уравнение потока теплоты к поверхности частиц будет иметь вид:

$$\overline{q} = \gamma Ve^2 \left(\frac{dq_s}{SFo} \right) = \left(\frac{\alpha \gamma}{v_s^2} \right) = \left(\frac{\alpha \gamma}{v_s^2} \right) \left(\frac{dq_s}{d\tau} \right). \quad (25)$$

Для исключения коэффициента температуропроводности « α » представим (25) в следующем виде:

$$v_s = \frac{\chi \cdot N \cdot r \cdot K_p \cdot \partial P}{C_m \cdot \rho_v \cdot \partial T}, \quad (26)$$

где χ – относительный коэффициент сушки;

N – постоянная скорость сушки;

R_v – приведенный размер (высота слоя топлива);

γ – массовая концентрация топлива;

K_p – коэффициент;

$\frac{\partial P}{\partial T}$ – параметр, характеризующий изменение давления от температуры.

Скорость распространения фронта влажности в слое топлива зависит от температуры. В свою очередь скорость распространения фронта температуры зависит от влажности топлива. Если влажность топлива значительная (30% - 50%), то может наступить такой адиабатический процесс сушки топлива, при котором температура топлива и газов будет постоянная, равная температуре мокрого термометра. При этом процесс горения может прекратиться.

Нестационарное распространение фронта температур в двумерном анизотропном пространстве от источника температуры, расположенного в системе координат $(x, y) \in R^2$ во времени $(\tau) > 0$, можно представить в виде уравнения [5]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xx}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xy}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yx}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yy}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (27)$$

Начальными условиями для уравнения (27) будут:

$$T(0;0;\tau) = T_0. \quad (28)$$

$$T(x;y;0) = 0. \quad (29)$$

Для произвольной системы координат с началом координат в точке 0 компоненты тензора теплопроводности будут иметь вид:

$$\lambda_{xx}(T) = \lambda_{\zeta}(T) \cos^2 \varphi + \lambda_{\eta}(T) \sin^2 \varphi; \quad (30)$$

$$\lambda_{yy}(T) = \lambda_{\zeta}(T) \sin^2 \varphi + \lambda_{\eta}(T) \cos^2 \varphi; \quad (31)$$

$$\lambda_{xy}(T) = \lambda_{yx}(T) = [\lambda_{\zeta}(T) - \lambda_{\eta}(T)] \sin \varphi \cos \varphi; \quad (32)$$

$$\lambda_{\zeta}(T) = K_{\zeta} T^{\alpha}; \lambda_{\eta}(T) = K_{\eta} T^{\sigma}; \quad (33)$$

где $K_{\zeta}; K_{\eta}$ – постоянные коэффициенты;

φ – угол, ориентирующий главные оси 0ζ и 0η относительно принятой декартовой оси $0X$.

Решение уравнения (31) позволяет определить температуру как по площади, так и по глубине слоя топлива.

Анализ полученных результатов позволяет считать, что температура при $\varphi = 0$ и $\tau > 0$ изменяется в пределах эллипсов с осями l_x и l_y . Распределение температур имеет волновой характер. Фронт тепловой волны распространяется со скоростью:

$$V_x = \sqrt{T_0^{\sigma} \frac{\alpha K_{\zeta}}{\sigma \cdot b \cdot \tau}}. \quad (34)$$

$$V_y = \sqrt{T_0^{\sigma} \frac{\alpha K_{\eta}}{\sigma \cdot b \cdot \tau}}. \quad (35)$$

Переработанное топливо (щепа, пеллеты) можно считать анизотропным, т.е. значения коэффициентов теплопроводности вдоль осей X и Y одинаковые.

Тогда можно записать, что компоненты вектора теплового потока равны:

$$q_x = \kappa \nabla T; \quad (36)$$

$$q_y = \lambda \nabla T.$$

Или

$$q_{(xy)} = \lambda \nabla T. \quad (37)$$

Приравняем уравнения (24) и (37) и запишем:

$$q_{(x;y)} = \rho_v R_v r \frac{dC}{d\tau} (1 + R_b), \quad (38)$$

где $R_v = \frac{V_m}{S}$ – усредненная высота слоя топлива.

При установившемся процессе горения, постоянной влажности топлива $\frac{dC}{d\tau} = \text{Const}$ и значения критерия Ребиндера $R_b \ll 1$, уравнение (38) будет иметь вид:

$$\lambda T = \rho_v h_{\text{слоя}} \cdot r \cdot K_{\text{вл}}, \quad (39)$$

где $K_{\text{вл}}$ – коэффициент, характеризующий влажность топлива.

Подставляя значения в (39), можно рассчитать температуру дутьевого воздуха $T, ^\circ\text{K}$ для того, чтобы слой топлива высотой $h_{\text{слоя}}$ полностью высох и нагрелся до заданной температуры (до температуры горения). Так как расчетный расход топлива определяется за 1 час, то высота слоя топлива (для заданной площади колосниковой решетки) пропорционален расходу топлива кг/час.

Тогда,

$$T = \frac{\rho_v \cdot h_{\text{слоя}} \cdot r \cdot K_{\text{вл}}}{\lambda}, \quad (40)$$

где ρ_v – плотность топлива;

r – скрытая теплота парообразования;

λ – коэффициент теплопроводности;

h – высота слоя топлива;

T – температура слоя топлива

Расход тепла для сушки и нагрева топлива до заданной температуры топлива можно рассчитать по формуле:

$$q_s = L \cdot c \cdot \rho \cdot (t_k - t_n) \quad (41)$$

где L – объемный расход дутьевого воздуха;

$t_n; t_k$ – начальная и конечная температура дутьевого воздуха;

$c; \rho$ – теплоемкость и плотность дутьевого воздуха.

Учитывая то, что при сжигании топлива слоевым способом с двумя зонами пиролиза и подаче горячего воздуха по схеме «сверху – вниз», в зону горения будут поступать (подготовленные для горения) кокс и продукты пиролиза топлива. Скорость горения топлива при этом будет больше скорости горения при слоевом сжигании топлива и подаче не подогретого воздуха по схеме «снизу – вверх». КПД генератора тепловой энергии новой конструкции увеличивается до 95% - 96%. Экологическая эффективность этих ГТЭ значительно повышается, так как отсутствует химический и механический недожог, уменьшаются выбросы оксидов азота, отсутствуют выбросы бенз(а)пирена, оксидов серы и других загрязняющих примесей, содержащихся в топливе и в дутьевом воздухе.

Представляют научный и практический интерес комбинированные генераторы тепловой энергии с двумя зонами пиролиз (КГТЭДЗП), у которых в зольнике сжигается нетрадиционное жидкое топливо, например, водно-угольное топливо или жидкие отходы животноводческих ферм, птицефабрик, очистных сооружений. В этом случае утилизация жидких стоков может быть источником дополнительной прибыли.

Выводы

Способ слоевого сжигания топлива с двумя зонами пиролиза обеспечивает повышение КПД ГТЭ за счет поступления в зону горения горячей высокотемпературной

газовоздушной смеси и разогретого кокса, что способствует увеличению скорости горения топлива и исключает химический и механический недожог.

Повышение экологической эффективности ГТЭДЗП достигается за счет уменьшения образования оксидов азота.

Отсутствие химического и механического недожога и высокая температура слоя кокса обеспечивают сжигание загрязняющих веществ, способных гореть, исключают выбросы в атмосферу опасных компонентов топлива.

Предлагаемая конструкция ГТЭ позволяет заменять традиционные виды топлива на биологическое топливо, сжигать жидкие стоки животноводческих ферм, птицефабрик и других предприятий.

1. Щеголев М.М., Гусев Ю.Л., Иванова М.С. Котельные установки. –М.: Изд. лит. по строительству, –1966. – 424 с.
2. Лукьянов А.В. Теоретические основы и способы повышения энергетических характеристик теплогенераторов для локальных систем теплоснабжения: автореф. докт. дис. на соиск. научн. степени – Макеевка. – 2008. – 26 с.
3. Патент № 49221 Украина. Генератор тепловой энергии / Шушляков А.В., Шушляков Д.А. и др. Оpubл. 26.04.2010. Бюл. №8.
4. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. –М.: Химия. - 1988. – 352 с.
5. Формалев В.Ф., Селин И.А., Кузнецова Е.Л. Моделирование тепловых волн в нелинейном анизотропном пространстве / Вести Самарского техн. Университета. – 2010. – №1(20). – С.239-243.

А.В. Шушляков, Д.В. Шушляков, В.В. Чернокрилюк

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ШВИДКІСТЬ І ПОВНОТУ ЗГОРАННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА ШАРІВИМ СПОСОБОМ З ДВОМА ЗОНАМИ ПІРОЛІЗУ В КОМБІНОВАНИХ ГЕНЕРАТОРАХ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто спосіб шарового спалювання палива з двома зонами піролізу забезпечує підвищення ККД ГТЕ за рахунок надходження в зону горіння горючої високотемпературної газоповітряної суміші і розігрітого коксу, що сприяє збільшенню швидкості горіння палива і виключає хімічний і механічний недожог.

A.V. Shyshlyakov, D.V. Shyshlyakov, V.V. Chernokrylyuk

FACTORS THAT ARE INFLUENCE ON THE RATE AND EFFICIENCY OF FUEL COMBUSTION AT LAYERS METHOD WITH TWO PYROLYSIS ZONES IN COMBINED HEAT GENERATORS

The article considers method layer combustion of fuel with two zones of pyrolysis enhances efficiency of efficiency factor because of income to the combustion zone high-temperature fuel-air mixture and heated coke, which increases the speed of fuel burning and eliminates chemical and mechanical underburning.