

УДК 621.181:662.612

В.К. Любов

Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики. Архангельского государственного технического университета. Имеет более 160 публикаций в области совершенствования энергохозяйства промышленных предприятий.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Проанализированы результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения и горения частиц древесины, бурых и каменных углей; установлены закономерности и предложены обобщающие зависимости для расчета отдельных стадий горения и их взаимного наложения во времени.

Ключевые слова: твердое топливо, уголь, древесина, топочная камера, котельная установка, эмиссия вредных веществ, воспламенение и горение топлива, сушка и выход летучих веществ, горение летучих веществ и коксового остатка.

Важным направлением в решении проблем охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов является повышение экологических показателей энергетического оборудования на базе использования новых методов сжигания и прогрессивных конструктивных решений.

В топливном балансе Архангельской области доля каменных углей составляет около 32 % (с учетом их фактической теплотворной способности). При этом угли Печорского бассейна играют доминирующую роль (90 ... 95 %). Сжигание данных углей (особенно интинского) в топках котлов, работающих по схеме прямоточного факела, сопровождается интенсивным шлакованием поверхностей нагрева, что приводит к недовыработке станциями тепловой и электрической энергии [6, 11]. Кроме этого, для котлоагрегатов, работающих по схеме прямоточного факела, характерна повышенная эмиссия вредных веществ в высокотемпературной зоне горения и взрывоопасность систем пылеприготовления. Поэтому повышение эффективности сжигания углей Печорского бассейна и сильношлакующих углей ряда других месторождений, а также отходов переработки древесины имеет большое хозяйственное значение [7, 12]. В качестве альтернативных направлений, позволяющих решить отмеченные проблемы, можно рекомендовать следующие низкотемпературные схемы сжигания твердого топлива: в топках с низкотемпературным вихрем (НТВ) и в топках с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. Данные технологии сжигания предполагают использование топлив углубленного гранулометрического состава, вплоть до немолотых [6, 7, 11].

Анализ эксплуатации НТВ-котлов при сжигании немолотых топлив показал [6, 7, 11, 12], что данная технология является перспективной, так как исключает условия для хлопков и взрывов, обеспечивает возможность ступенчатого сжигания топлив и снижения эмиссии вредных веществ. Исследования выявили ряд существенных особенностей топочных процессов в НТВ-котлах по сравнению со схемой прямоточного факела. Для создания экономичного и надежного топочного устройства, обеспечивающего сжигание широкой гаммы немолотых твердых топлив (включая торф и отходы

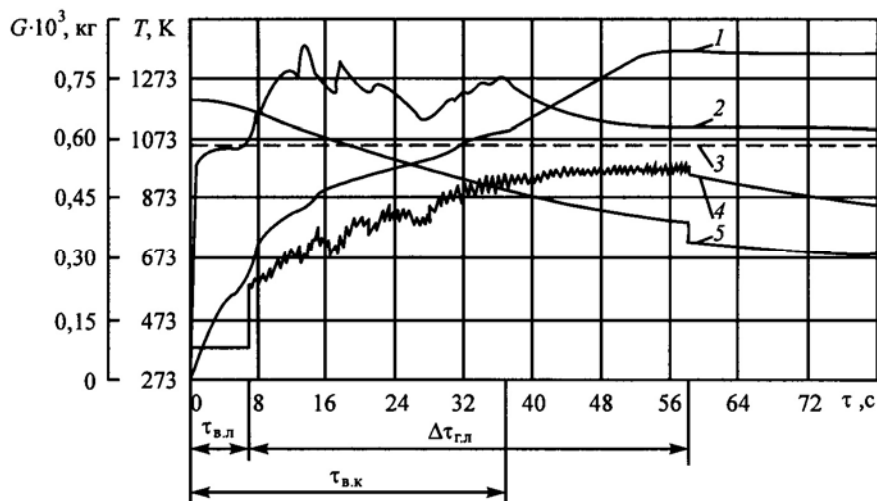


Рис. 1. Характер горения частицы воркутинского угля: $G_0 = 0,7$ г; $d_0 = 10,07$ мм; 1 — температура частицы $r/r_0 = 0,86$; 2 — температура на расстоянии 2,5 мм от частицы; 3 — $T_p = 1053$ К; $W_p = 2,35$ м/с; 4 — сигнал фоторезистора; 5 — изменение массы

переработки древесины) необходимо изучить процессы, протекающие при нагреве, воспламенении и горении крупных частиц топлива на промышленных и стендовых установках.

Для этого была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить комплексное исследование процессов тепло- и массообмена для одиночных частиц в условиях, близких к условиям реальной топочной камеры [9]. Конструкция установки (рис. 1) позволяет непрерывно фиксировать изменение массы образца во времени, яркость топливной частицы и температуру внутри частицы и около нее при различных температурных и гидродинамических условиях ($T_r = 400 \dots 1400$ К, $W_p = 0 \dots 5$ м/с). Исследования выполняли для сферических частиц (диаметр $d_0 = 5 \dots 30$ мм), изготовленных из древесины хвойных пород и из кусков азейского бурого, черемховского, интинского, воркутинского и кузнецкого (марки Д, Г, 2СС) каменных углей.

В реакционной камере процесс прогрева сопровождается сушкой и выходом летучих, которые в стехиометрической смеси (летучие — окисли-

тель) воспламеняются. Обработка опытных данных с учетом продолжительности прогрева практически сухих (влажность рабочей массы $W^r \leq 8\%$; для частиц из древесины хвойных пород $W^r \leq 10\%$) топливных частиц ($T_r = 1123 \dots 1373$ К, $W_{\Pi} = 0,1 \dots 3$ м/с) до воспламенения летучих показала, что результаты могут быть обобщены выражением:

$$\tau_{в.л} = k_{в.л} T_r^{n_{в.л}} d_{ч}^{m_{в.л}} (1 + W_{\Pi}^{c_{в.л}}), \quad (1)$$

Коэффициенты, характеризующие влияние различных параметров на продолжительность процесса горения древесины и углей

Коэффициент	Древесина (ель, сосна)	Азейский Б	Черемховский Д	Интинский Д	Кузнецкий			Воркутинский Ж
					Д	2СС	Г	
$k_{в.л}$	$5,70 \cdot 10^{13}$	$5,42 \cdot 10^{13}$	$5,81 \cdot 10^{13}$	$3,55 \cdot 10^{13}$	$2,55 \cdot 10^{13}$	$3,93 \cdot 10^{13}$	$2,31 \cdot 10^{13}$	$2,76 \cdot 10^{13}$
$n_{в.л}$	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00	-4,00
$m_{в.л}$	0,47	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$c_{в.л}(W_{\Pi} \leq 1 \text{ м/с})$	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,09	-0,17	-0,11	-0,13
$c_{в.л}(W_{\Pi} > 1 \text{ м/с})$	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16	-0,17	-0,28	-0,19	-0,22
$k_{г.л}$	$2,12 \cdot 10^8$	$4,31 \cdot 10^8$	$4,55 \cdot 10^8$	$8,76 \cdot 10^8$	$8,32 \cdot 10^8$	$13,19 \cdot 10^8$	$8,45 \cdot 10^8$	$10,52 \cdot 10^8$
$n_{г.л}$	-1,20	-1,16	-1,16	-1,26	-1,28	-1,35	-1,3	-1,32
$m_{г.л}$	1,57	1,90	1,90	1,87	1,83	1,79	1,79	1,78
$c_{г.л}(W_{\Pi} \leq 1 \text{ м/с})$	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,14	-0,17	-0,16	-0,17
$c_{г.л}(W_{\Pi} > 1 \text{ м/с})$	-0,44	-0,44	-0,45	-0,46	-0,49	-0,57	-0,55	-0,56
$k_{в.к}$	$8,95 \cdot 10^8$	$2,09 \cdot 10^8$	$2,45 \cdot 10^8$	$6,96 \cdot 10^8$	$9,76 \cdot 10^8$	$31,98 \cdot 10^8$	$23,38 \cdot 10^8$	$31,59 \cdot 10^8$
$n_{в.к}$	-1,58	-1,41	-1,42	-1,60	-1,64	-1,73	-1,70	-1,72
$m_{в.к}$	1,23	1,31	1,33	1,34	1,36	1,46	1,45	1,47
$c_{в.к}(W_{\Pi} \leq 1 \text{ м/с})$	-0,16	-0,16	-0,16	-0,17	-0,18	-0,20	-0,19	-0,20
$c_{в.к}(W_{\Pi} > 1 \text{ м/с})$	-0,85	-0,85	-0,86	-0,88	-0,90	-0,99	-0,96	-0,98
$k_{г.к}$	$7,59 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^8$	$2,19 \cdot 10^8$	$3,53 \cdot 10^8$	$3,59 \cdot 10^8$	-	$10,39 \cdot 10^8$	$15,98 \cdot 10^8$
$n_{г.к}$	-0,8	-0,81	-0,84	-0,89	-0,87	-	-0,91	-0,93
$m_{г.к}$	1,7	1,54	1,56	1,60	1,63	-	1,80	1,83
$c_{г.к}(W_{\Pi} \leq 1 \text{ м/с})$	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-	-0,18	-0,18
$c_{г.к}(W_{\Pi} > 1 \text{ м/с})$	-0,32	-0,33	-0,35	-0,39	-0,38	-	-0,42	-0,44

где $k_{в.л}$, $n_{в.л}$, $m_{в.л}$, $c_{в.л}$ – коэффициенты, рассчитанные по методу наименьших квадратов (МНК) [10] (для частиц древесины – по методу Брандона [1]), значения которых для исследованных топлив приведены в таблице;

$d_{ч}$ – диаметр частицы, м;

T_r, W_{Π} – температура и скорость газового потока, К; м/с.

Исследования показали, что на данной стадии частицы прогреваются главным образом за счет лучистого теплообмена, при конвективном теплообмене продолжительность прогрева частицы до воспламенения летучих была бы пропорциональна $d_{ч}^2$ и T_r^{-1} . Об этом же свидетельствует и незначи-

тельное влияние скорости обдувающего потока на $\tau_{в.л}$ [4, 6]. Прослойка продуктов разложения органической массы топлива, образующаяся у поверхности частицы при ее прогреве, по-видимому, препятствует конвективному подводу теплоты. При увеличении скорости газового потока ($W_{п} > 1$ м/с) его влияние на процесс прогрева усиливается (см. таблицу), особенно для топлив со спекающимся коксовым остатком. Вывод об определяющей роли лучистого теплообмена для крупных топливных частиц подтвержден расчетами [5, 6]. Для прогрева мелких фракций топлива были получены похожие результаты [2, 4]. Однако на продолжительность прогрева крупных частиц топлива до воспламенения летучих размер частицы оказывает меньшее влияние, чем мелких. Частицы азейского бурого и черемховского каменного углей имеют наибольшую продолжительность данной стадии; у древесных частиц она еще больше (рис. 2). Очевидно, это объясняется большей влажностью частиц топлив и в некоторой степени меньшими значениями коэффициентов температуропроводности (для азейского и черемховского углей) [6].

Повышение зольности A^d топливных частиц увеличивает продолжительность прогрева до воспламенения летучих. Так, для интинского каменного угля рост зольности на сухую массу от 7 до 52 % увеличивает продолжительность первой стадии в 2,2 раза. Сравнение расчетных данных по продолжительности прогрева до воспламенения летучих, полученных по уравнению (1) для частиц $d_{ч} = 1 \dots 5$ мм, с экспериментальными данными других

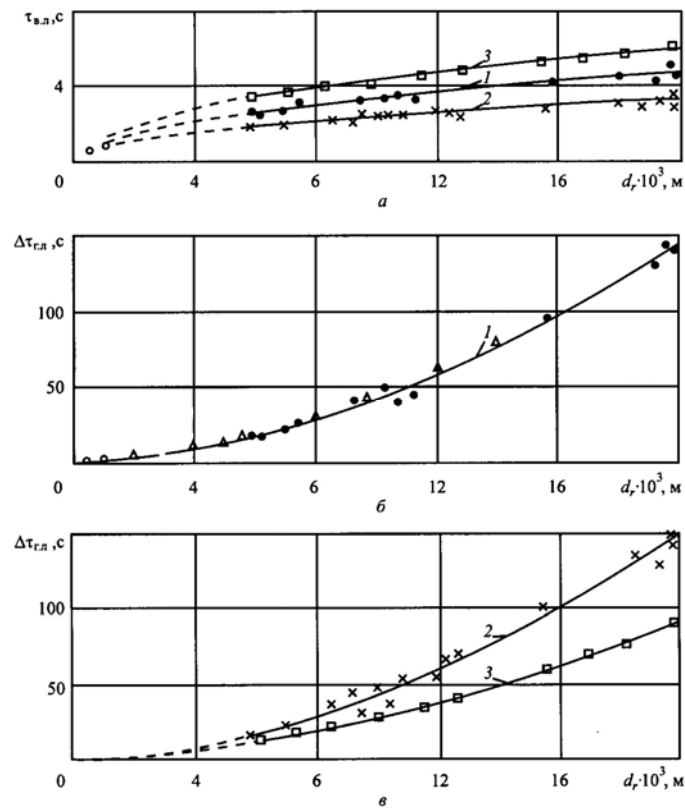


Рис. 2. Влияние размера d_q частиц угля на продолжительность прогрева до воспламенения летучих (а) и горения летучих (б, в): 1 – ● – кузнецкий 2СС ($T_r = 1223$ К; $W_{п} = 1,6$ м/с); 2 – × – воркутинский жирный ($T_r = 1223$ К; $W_{п} = 1,6$ м/с); Δ – СС (шах. № 13, Кузбасс); $W^a = 2,5$ %; $A^d = 8,8$ %; $V^{daf} = 32,2$ %; $\rho_k = 1063$ кг/м³; $T_r = 1223$ К; $W_{п} = 0,1$ м/с [3]; ○ – кузнецкий СС ($W^a = 2,6$ %; $A^d = 3,6$ %; $V^{daf} = 19$ %; $T_r = 1223$ К) [2]; 3 – □ – древесина хвойная ($T_r = 1223$ К)

авторов показало, что по эмпирической зависимости, предложенной в [2], для частиц кузнецкого угля марок Д и Г ($d_q = 1$ мм, $T_r = 1223$ К) $\tau_{в.л.}$ соответственно равно 0,76 и 0,71 с, а по зависимости (1) при $W_{п} = 0,1$ м/с – соответственно 0,80 и 0,75 с, т. е. расхождение составляет –5,3 и –5,6 %. Ввиду недостаточного количества надежной информации по $\tau_{в.л.}$ для топливных частиц $1 < d_q < 5$ мм зависимость (1), по-видимому, можно применять в диапазоне $d_q = 1 \dots 30$ мм.

Характер процессов, происходящих в период видимого горения летучих, для исследованных топлив был проанализирован ранее [8]. Обработка полученных результатов позволила обобщить их следующим эмпириче-

ским выражением (погрешность $\pm 16\%$, большие значения относятся к топливам со спекающимся коксовым остатком):

$$\Delta\tau_{г.л} = k_{г.л} T_{г.л}^{n_{г.л}} d_{ч}^{m_{г.л}} (1 + W_{п}^{c_{г.л}}). \quad (2)$$

На продолжительность видимого горения летучих ($\Delta\tau_{г.л}$) определяющее влияние оказывает размер топливной частицы (рис. 2). Температура реакционной камеры значительно меньше влияет на продолжительность данной стадии, чем на $\tau_{в.л}$ (см. таблицу). Это объясняется тем, что теплота к частице поступает в основном от факела горящих летучих. Температурный фактор оказывает более сильное действие на $\Delta\tau_{г.л}$ для углей со спекающимся коксовым остатком, что можно объяснить струйным характером выхода и горения летучих (сплошное облако горящих летучих при этом может отсутствовать [8]), менее сильное – для топлив с порошкообразным коксовым остатком, горение летучих у которых происходит в виде сплошного облака, окутывающего частицу. Этим же обстоятельством можно объяснить и более сильное влияние скорости набегающего потока на $\Delta\tau_{г.л}$ для топливных частиц со спекающимся коксовым остатком.

Расчет продолжительности видимого горения летучих по зависимости (2) для частиц кузнецкого угля марок Д и Г ($d_{ч} = 1$ мм, $T_{г} = 1223$ К, $W_{п} = 0,1$ м/с) дает соответственно 0,72 и 0,85 с, а по зависимости [2, 4] – соответственно 0,80 и 0,78 с. Расхождение составляет 10 и -9% . Сравнение расчетных данных для частиц бурого угля ($d_{ч} = 4,65; 8,77$ мм; $T_{г} = 1273$ К; $W_{п} = 0,1$ м/с) по зависимости (2) ($\Delta\tau_{г.л}^{расч} = 9,37; 31,3$ с) с опытными [3] ($\Delta\tau_{г.л}^{опыт} = 9,0; 25,2$ с; учитывая, что автор [3] использовал прессованные частицы, кажущаяся плотность которых была меньше, чем частиц натурального топлива, и зависела от диаметра частиц; после ввода поправки на плотность получим $\Delta\tau_{г.л} = 9,0; 27,5$ с) показало, что расхождение составляет $-4,1$ и $-13,8\%$. При снижении влажности топливных частиц продолжительность периода видимого горения летучих уменьшается. Так, для частиц черемховского угля при уменьшении влажности от 18,0 до 4,6 % ($d_{ч} = 10 \dots 17$ мм, $T_{г} = 1173 \dots 1223$ К, $W_{п} = 2,0 \dots 2,7$ м/с) продолжительность видимого горения летучих снижается на 22,9 %. Повышение зольности топлива приводит к снижению $\Delta\tau_{г.л}$. Так, для частиц интинского угля при повышении зольности от 5,5 (выход летучих на горючую массу $V^{daf} = 39\%$) до 52,0 % ($V^{daf} = 37,2\%$) продолжительность видимого горения летучих уменьшилась примерно на 30 %. Характер влияния данных факторов на продолжительность видимого горения летучих, по-видимому, определяется их воздействием на скорость прогрева топливных частиц [6, 8]. Вместе с этим при повышении зольности количество горючей массы топлива уменьшается, что также вызывает снижение $\Delta\tau_{г.л}$. Анализ полученных результатов и сравнение их с опытными данными других исследователей (рис. 2) позволили сделать вывод о возможности применения зависимости (2) в диапазоне $d_{ч} = 1 \dots 30$ мм не только для исследованных топлив, но и для близких к ним по теплотехническим свойствам.

Термическое разложение органической массы топлива начинается сразу же после ввода частицы в реакционную камеру. За период времени от момента ввода частицы в реактор до окончания видимого горения летучих ($\tau_{о.л}$) из нее выделяется основная масса летучих веществ. Продолжительность данного периода можно определить по формуле

$$\tau_{о.л} = \tau_{в.л} + \Delta\tau_{г.л}. \quad (3)$$

В начальный период видимого горения летучих топливная частица имеет темный цвет и в реакции горения не участвует [8], однако в процессе прогрева интенсивность выхода летучих уменьшается и кислород получает частичный доступ к ее поверхности. Параллельно с горением летучих начинается горение углеродного материала с поверхности частицы. Момент воспламенения углеродного материала характеризуется повышением скорости прогрева частицы, что зафиксировано термопарой, фоторезистором и визуально [8, 9]. Экспериментальные данные (рис. 3), отражающие длительность прогрева частицы до воспламенения углеродного материала ($\tau_{в.к}$), удовлетворительно описываются следующим уравнением:

$$\tau_{в.к} = k_{в.к} T_{г}^{n_{в.к}} d_{ч}^{m_{в.к}} (1 + W_{п}^{c_{в.к}}). \quad (4)$$

Продолжительность совместного горения летучих и кокса ($\Delta\tau_{совм}$) зависит от многих факторов [8], определяющее влияние при этом оказывают размер частицы, степень метаморфизма топлива и скорость газового потока. Для определения продолжительности этого процесса следует использовать зависимость

$$\Delta\tau_{совм} = \tau_{о.л} - \tau_{в.к}. \quad (5)$$

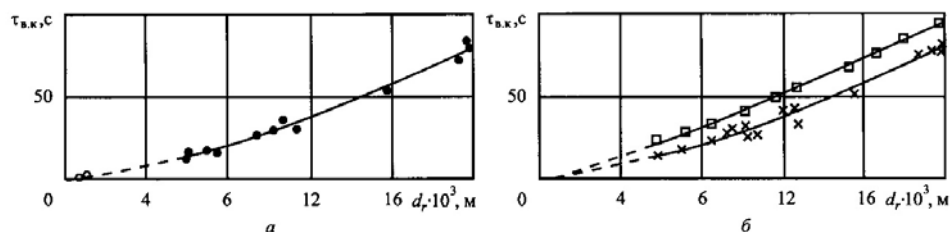


Рис. 3. Влияние размера частиц на продолжительность прогрева до воспламенения кокса ($T_{г} = 1223 \text{ К}$; $W_{п} = 1,6 \text{ м/с}$); • – кузнецкий 2СС; × – воркутинский жирный; ○ – кузнецкий СС ($W^a = 2,6 \%$; $A^d = 3,6 \%$; $V^{daf} = 19 \%$; $T_{г} = 1223 \text{ К}$) [2]; □ – древесина хвойная ($T_{г} = 1223 \text{ К}$; $W_{п} < 1,0 \text{ м/с}$)

Горение кокса является основной стадией процесса горения углей как по продолжительности (84 ... 92 %), так и по тепловыделению. При обработке опытных данных по продолжительности данной стадии возникли значительные трудности, вызванные частичным или «полным» разрушением [8] угольных частиц при горении (данное обстоятельство и недостаточное количество экспериментальных данных не позволили получить обобщающую зависимость $\Delta\tau_{г.к} = f(T_{г}, d_{ч}, W_{п})$ для кузнецкого угля марки 2СС). Для частиц из древесины ели и сосны разрушение происходило реже, чем для угольных. При отсутствии разрушения частиц экспериментальные данные по определению продолжительности стадии горения кокса $\Delta\tau_{г.к}$ для ис-

следованных топлив удовлетворительно описываются следующим эмпирическим уравнением:

$$\Delta\tau_{г.к} = k_{г.к} T_{г}^{n_{г.к}} d_{ч}^{m_{г.к}} (1 + W_{п}^{c_{г.к}}) (21/O_2)^{\ell}, \quad (6)$$

где O_2 – концентрация кислорода, %.

Зависимость продолжительности горения кокса от размера частиц $\sim d^{1,7}$ (см. таблицу) и обратно пропорциональна температуре реакционной камеры (показатель степени ~ -1). Это указывает на то, что режим горения коксовых частиц в условиях опытов близок к промежуточному. С ростом скорости обтекания частицы газовым потоком диффузионное торможение гетерогенной реакции горения углеродного материала уменьшается (особенно при $W_{п} > 1$ м/с), что приводит к снижению $\Delta\tau_{г.к}$. Для расчета продолжительности полного сгорания частицы при отсутствии ее разрушения можно использовать уравнение

$$\tau_{с.ч} = \tau_{в.к} + \Delta\tau_{г.к}. \quad (7)$$

Процесс горения крупных частиц натурального топлива часто сопровождается их разрушением до более мелких частиц, что может значительно уменьшить продолжительность полного сгорания частицы по сравнению с расчетной (7). Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод, что горение крупных топливных частиц сопровождается образованием мелких фракций как за счет их разрушения, так и вследствие выноса углеродных частиц потоком летучих веществ [8]. Данное обстоятельство следует учитывать при проектировании топочных камер, работающих на топливе грубого фракционного состава и немолотом. Выгорание сильно забалластированных кусков топлива идет очень медленно (при повышении зольности от 5,8 до 52,0 % для частиц интинского каменного угля $\Delta\tau_{г.к}$ увеличивается \sim в 2 раза), а их прочностные характеристики снижаются незначительно [8]. В связи с этим для НТВ-топок, сжигающих немолотое топливо, необходимо разрабатывать мероприятия, позволяющие уменьшить возможность попадания сильно забалластированных кусков топлива в топочную камеру, а также организовывать их вывод из топки.

Продолжительность полного выгорания древесных частиц значительно меньше, чем угольных частиц того же размера, что объясняется меньшей плотностью древесины и значительно большим содержанием летучих веществ.

Увеличение влажности топлива сказывается на продолжительности стадии прогрева до воспламенения летучих. Результаты экспериментальных исследований, выполненных для широкой гаммы топлив в диапазоне изменения влажности $W^r = 3 \dots 40$ %, могут быть обобщены уравнением [6, 11]:

$$\tau_{в.л} = 49 k_{в.л} d_{ч}^{0,5} \exp(0,05W^r) / \left\{ (T_{г} / 1000)^4 \left[1 + 0,125W_{п}^{0,4} / (T_{г} / 1000)^3 \right] \right\}, \quad (8)$$

где $k_{в.л}$ – эмпирический коэффициент, рассчитанный по МНК, имеющий следующие значения для каменных углей: черемховский – 1,02; кузнецкий Г и Д – 0,98; воркутинский – 1,00; интинский – 1,13; кузнецкий 2СС – 1,426; для бурых углей: азейский – 0,86; березовский – 1,12; ирша-бородинский – 1,30; для древесины (ель, сосна) – 1,764.

Таким образом, на основании экспериментальных исследований процесса горения частиц древесины, бурых и каменных углей установлены закономерности и предложены обобщающие зависимости для расчета продолжительности стадий прогрева и сушки до воспламенения летучих, видимого горения летучих и коксового остатка, а также их взаимного наложения во времени. Анализ полученных результатов и сравнение их с экспериментальными данными других авторов (рис. 2–4) позволили сделать предположение о возможности применения полученных зависимостей для частиц $d_{\text{ч}} = 1 \dots 30$ мм, $T_{\text{г}} = 600 \dots 1600$ К и скоростей потока $W_{\text{п}} = 0 \dots 5$ м/с не только для исследованных топлив, но и для близких к ним по теплотехническим свойствам и кинетическим характеристикам.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при расчете горения летучих для частиц немолотого топлива следует использовать схему «двойного горящего» пограничного слоя [6, 11], применяя для летучих аналог критерия Семенова. При этом выгорание углерода происходит по восстановительным реакциям при взаимодействии с водяным паром и углекислым газом. В конце стадии видимого горения летучих окислитель получает доступ к углеродной основе топлива, выгорание которой происходит по окислительно-восстановительным гетерогенным реакциям с кислородом, водяным паром и углекислым газом по схеме «негорящего» пограничного слоя.

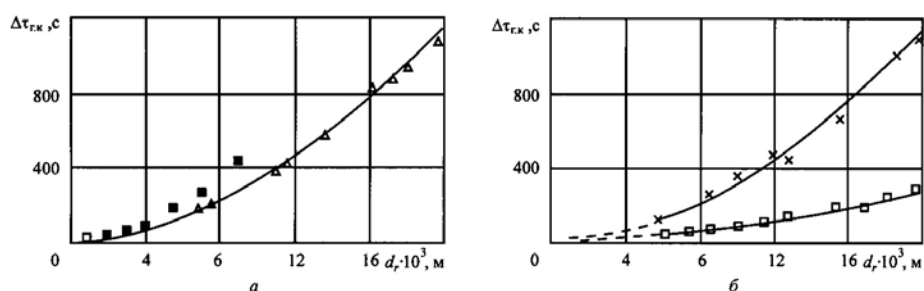


Рис. 4. Влияние размера частиц на продолжительность горения кокса: Δ – кузнецкий уголь Г ($T_{\text{г}} = 1223$ К; $W_{\text{п}} = 1,6$ м/с); \times – воркутинский жирный ($T_{\text{г}} = 1223$ К; $W_{\text{п}} = 1,6$ м/с); \square – кузнецкий ($W^{\text{л}} = 6,6$ %; $A^{\text{д}} = 7,5$ %; $V^{\text{daf}} = 35,8$ %; $T_{\text{г}} = 1223$ К) [2]; \blacksquare – газовый уголь ($W^{\text{л}} = 2,5$ %; $T_{\text{г}} = 1223$ К) (данные А.Н. Кочережко); \square – древесина хвойная ($T_{\text{г}} = 1223$ К)

Процесс термического разрушения крупных частиц натурального твердого топлива на более мелкие, сопровождающий горение, может значительно уменьшить продолжительность их выгорания.

Результаты выполненных исследований были использованы при разработке рекомендаций по повышению эффективности работы НТВ-котлов и обосновании слое-вихревых и факельно-вихревой схем сжигания древесных отходов, а также при разработке методики расчета высокотемпературной сушки топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахназарова, С.Л.* Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст]: учеб. пособие для химико-технологических вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1978. – 319 с.
2. *Бабий, В.И.* О длительности горения частиц пыли кузнецких углей марок Д, Г, ГЖ, СС [Текст] / В.И. Бабий, И.П. Иванова // Теплоэнергетика. – 1977. – № 1. – С. 13–15.
3. *Евсеева, С.А.* Исследование процесса горения угольных частиц [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Евсеева С.А. – М., 1974. – 165 с.
4. *Иванова, И.П.* Изучение механизма выгорания частиц назаровского угля [Текст] / И.П. Иванова, В.И. Бабий // Горение твердого топлива: материалы II Всесоюз. конф. – Новосибирск: Наука, 1969. – С. 140–149.
5. *Любов, В.К.* Исследование тепло- и массообмена при прогреве и горении крупных частиц натурального твердого топлива [Текст] / Любов В.К. // Основные этапы и направления развития энергетики Архангельской области. – Архангельск, 1982. – С. 31–32.
6. *Любов, В.К.* Некоторые результаты исследования процесса горения натурального твердого топлива [Текст] / В.К. Любов / Арханг. лесотехн. ин-т. – Архангельск, 1985. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО №1732 эн-Д85. – 31 с.
7. *Любов, В.К.* Опыт сжигания высоковлажных отходов промышленности в топке безмельничного котлоагрегата [Текст]: тр. 1-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. Тепло-массообмен при хим. превращениях / В.К. Любов, В.А. Дьячков, Ф.З. Финкер, И.Б. Кубышкин. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – С. 163–168.
8. *Любов, В.К.* Характер поведения крупных частиц натурального твердого топлива при различных условиях теплообмена и исследование прогрева угольных частиц [Текст] / В.К. Любов, С.М. Шестаков / ЛПИ. – Л., 1982. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО. – 40 с.
9. *Любов, В.К.* Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена при прогреве и горении частиц твердого топлива [Текст] / В.К. Любов, А.И. Сосенский, С.М. Шестаков. – Л., 1981. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО. – 14 с.
10. *Шенк, Х.* Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
11. *Шестаков, С.М.* Низкотемпературная вихревая технология сжигания дробленого топлива в котлах как метод защиты окружающей среды [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.16 / Шестаков С.М. – СПб., 1999. – 39 с.
12. *Шестаков, С.М.* Особенности низкотемпературного вихревого сжигания немолотых бурых и каменных углей [Текст] / С.М. Шестаков, В.К. Любов, А.М. Павлов, Б.В. Усик // Горение органического топлива: материалы V Всесоюз. конф. ИТФ СО АН СССР. – Новосибирск: СО АН СССР, 1985. – Ч. 2. – С. 225–234.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 24.06.05

V.K. Lyubov

Experimental Research of Ignition and Burning of Solid Fuel Particles

The results of experimental research of burning process for wood particles, brown and hard coal are analyzed, regularities are set and generalized dependencies for calculating separate stages of burning volatile substances and their mutual imposition in time are offered.