

УДК 621.181

В.К. Любов

Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 150 публикаций в области совершенствования энергохозяйств промышленных предприятий.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЧАСТИЦ НЕМОЛОТОГО ТОПЛИВА

Исследовано термомеханическое разрушение частиц твердого топлива; определены факторы, влияющие на данные процессы и наиболее благоприятные периоды для их наступления; предложены аппроксимирующие зависимости для расчета критической скорости, вызывающей разрушение топливных частиц при их ударе о преграду.

Ключевые слова: твердое топливо, тепловые напряжения, терморазрушение, уголь, древесина, топочная камера, котельная установка, радиальные и окружные компоненты напряжения, видимое горение летучих веществ, горение кокса.

Анализ эксплуатации низкотемпературных вихревых (НТВ) котлов и котлов с «кипящим» слоем при сжигании немолотых топлив показал, что эти технологии являются перспективными, так как исключают условия для хлопков и взрывов, обеспечивают возможность ступенчатого сжигания топлива в целях максимального снижения эмиссии вредных веществ, а также допускают ввод и эффективное использование сорбентов в топочных камерах для дополнительного снижения вредных выбросов. Исследования выявили ряд существенных особенностей топочных процессов в НТВ-котлах и котлах с «кипящим» слоем [1–3, 7–9] по сравнению со схемой прямооточного пылеугольного факела. Для создания экономичных и надежных топочных устройств, обеспечивающих сжигание широкой гаммы немолотых твердых топлив, необходимо изучить процессы, протекающие при нагреве, воспламенении и горении крупных частиц топлива [1, 4, 6].

При этом 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 [6]. Конструкция установки позволяет непрерывно фиксировать изменение массы образца во времени, яркость топливной частицы и температуру внутри и около нее при различных температурных и гидродинамических условиях ($d_{\text{ч}} = 5 \dots 30$ мм, $T_{\text{п}} = 400 \dots 1400$ К, $W_{\text{п}} = 0 \dots 5$ м/с). Исследования выполняли для сферических частиц, изготовленных из древесины хвойных пород, кусков азейского бурого, черемховского, интинского, воркутинского и кузнецкого (марки Д, Г, 2СС) каменных углей.

Выполненные эксперименты показали, что наличие значительного градиента температур ($\Delta T_{\text{пов-ц}}$) между поверхностью и центром (рис. 1) при прогреве крупных частиц твердого топлива вызывает появление в них тепловых напряжений. Для оценки этих напряжений и возможности терморазрушения топливных частиц был произведен расчет температурных напряжений по глубине частиц. Сферическое тело, в зависимости от размера, разбивали на 7–11 концентрических объемов, в которых выбирали узловые точки. Распределение температур в узловых точках было получено при решении задачи нестационарной теплопроводности [1, 3, 8]. В силу симметрии нулевыми будут три компонента напряжения. При условии симметричного относительно центра частицы распределения температур, изотропности материала (анизотропию угля можно не учитывать при содержании углерода



на горючую массу $C^{\text{daf}} < 94\%$), а также отсутствия усилий на внешней поверхности (при $r = r_0$, $\sigma_r = 0$) радиальную (σ_r^t) и окружную ($\sigma_{\theta_1}^t$, $\sigma_{\theta_2}^t$) компоненты напряжения рассчитывали по зависимостям, предложенным С.П. Тимошенко:

$$\sigma_r^t = \frac{2\alpha^t E}{1-\nu} \left(\frac{1}{r_0^3} \int_0^{r_0} Tr^2 dr - \frac{1}{r^3} \int_0^r Tr^2 dr \right);$$

$$\sigma_{\theta_1}^t = \sigma_{\theta_2}^t = \frac{\alpha^t E}{1-\nu} \left(\frac{2}{r_0^3} \int_0^{r_0} Tr^2 dr + \frac{1}{r^3} \int_0^r Tr^2 dr - T \right),$$

где ν , E , α^t — соответственно коэффициент Пуассона, модуль упругости, коэффициент теплового расширения топливной частицы.

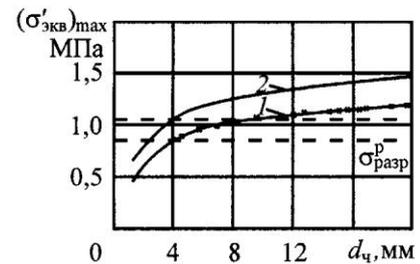
При расчете эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}^t$ для внутренней области частицы, где возникают растягивающие усилия, использовали первую теорию прочности, для наружного слоя (сжимающие напряжения) — теорию Мора.

Анализ показал, что величина градиента температур между поверхностью и центром оказывает влияние на величину внутренних напряжений топливной частицы (рис. 1). Эквивалентное напряжение в направлении к центру частицы возрастает и достигает максимального значения в период видимого горения летучих. В дальнейшем оно уменьшается до момента воспламенения углеродного материала с поверхности частицы; в данный момент наблюдают второй «относительный» максимум для $\sigma_{\text{экв}}^t$. Исходя из характера изменения температурных напряжений по глубине частицы, мож-

но предположить, что ее разрушение должно начинаться из центральной области, однако, учитывая, что прочностные характеристики топливной частицы в процессе ее горения резко снижаются и, особенно, значительно для поверхностных слоев, возможно и «поверхностное» разрушение частицы. При проведении экспериментов на стендовой установке наблюдались оба вида разрушений [1, 3, 4, 6].

Таким образом, температурные напряжения могут играть решающую роль в процессе разрушения топливной частицы в топочной камере. Так, терморазрушение в период видимого горения летучих происходило в 66,5 % опытов для частиц азейского и черемховского углей и в 55,5 % опытов для воркутинского жирного и кузнецкого газового углей (рис. 2, 3).

Рис. 2. Влияние размера частиц интинского угля на $(\sigma'_{\text{экв}})^i_{\text{max}}$ при $T_{\text{г}} = 1373 \text{ К}$:
1 – $W_{\text{п}} = 1,2 \text{ м/с}$; 2 – 12 м/с



9*

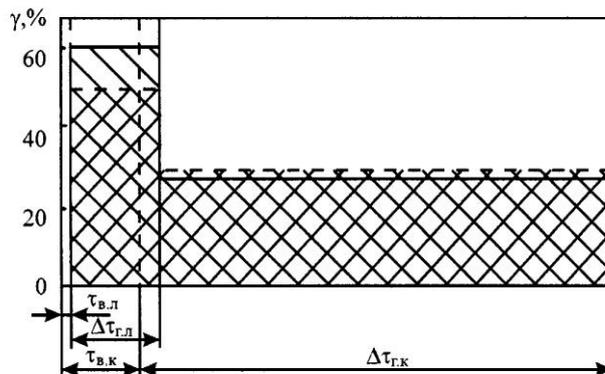


Рис. 3. Терморазрушение частиц в процессе горения ($d_{\text{ч}} = 5 \dots 20 \text{ мм}$, $T_{\text{г}} = 1073 \dots 1373 \text{ К}$, $W_{\text{п}} = 0,5 \dots 3 \text{ м/с}$, штриховка – азейский бурый и черемховский каменные угли; ромбики – кузнецкий Г и воркутинский каменные угли)

Как показали расчеты (рис. 2) и эксперименты (рис. 3), терморазрушение наиболее вероятно для частиц топлива размером $d_{\text{ч}} \geq 4 \text{ мм}$, так как термические напряжения по глубине угольных частиц, связанные с неизотермичностью прогрева по радиусу, достигали следующих значений: радиальные – 1,2 МПа, окружные – 1,6 МПа, эквивалентные – 1,3 МПа. Наиболее благоприятным для терморазрушения топливных частиц является период видимого горения летучих (для древесины – горение кокса). При умень-

шении размера частиц эквивалентные напряжения убывают, и для частиц $d_q < 4$ мм не следует ожидать термического разрушения.

Из характера движения газотопливных потоков в НТВ-топке следует, что разрушение частиц топлива обусловлено двумя основными процессами: собственно термическим разрушением и разрушением разогнанных газовыми потоками термонапряженных частиц при их ударе об ограждающие топку поверхности нагрева [3, 7–9]. Исследование процесса термомеханического разрушения сферических частиц каменных углей Печорского бассейна было выполнено на экспериментальной установке, конструкция которой рассмотрена в [5].

При отсутствии предварительной термической подготовки и прямом ударе ($\alpha = 0^\circ$) критическая скорость V^{*p} , вызывающая разрушение частиц, для данных углей составила 7,0 ... 7,5 м/с (большее значение для воркутинского угля). Экспериментальные данные были аппроксимированы зависимостью, предложенной в [7, 8], м/с:

$$V^{*p} = Bm^{-0,5},$$

где B – опытный коэффициент (для бурого угля: ирша-бородинского – 1,50; азейского – 1,36; для каменного угля: черемховского – 0,57; интинского – 0,47; воркутинского – 0,50);

m – масса частицы, кг.

Термообработка топливных частиц при $T = 900 \dots 1000$ К и времени выдержки 15 ... 25 с вызвала значительное снижение значений критической скорости (в 2–2,8 раза), которая для черемховского каменного, азейского и ирша-бородинского бурых углей составила $V^{*p} = 3 \dots 5$ м/с [7, 8]. Для углей Печорского бассейна наблюдалось аналогичное явление, при этом более сильное снижение критической скорости отмечено у воркутинского угля $V^{*p} = 3 \dots 4,8$ м/с. Экспериментальные данные по влиянию угла удара ($0 \leq \alpha \leq 60^\circ$), температуры ($900 \leq T \leq 1373$ К), времени ($5 \leq \tau \leq 90$ с) и убыли массы ($m_0 - m$) в процессе термообработки на значение критической скорости для частиц интинского и воркутинского каменных углей были аппроксимированы зависимостью

$$V^{*p} = (A + C \sqrt{\sin \alpha}) \exp \left\{ - \left[\left(\frac{t + 273}{273} \right)^{1,9} + 2 \left(\frac{m_0 - m}{m_0} \right)^d \right] 0,001 \tau \right\} + 0,01 + L \sqrt{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где m_0 – начальная масса частицы ($1 \cdot 10^{-3} \leq m_0 \leq 8 \cdot 10^{-3}$ кг);

A, C, d, L – эмпирические коэффициенты (для интинского угля: $A = 5,66$; $C = 2,5$; $d = 1,8$; $L = 1,5$; для воркутинского угля: $A = 5,32$; $C = 2,3$; $d = 1,4$; $L = 1,4$).

Наиболее сильное влияние на критическую скорость, вызывающую разрушение частиц, оказывают температура и продолжительность термообработки топлива. При отсутствии предварительной термической подготовки для частиц древесины критическую скорость определить не удалось, так как

она имела значения больше ($V^{кр} > 13$ м/с), чем позволяла получить экспериментальная установка. Это вызвано более высокими прочностными характеристиками древесины по сравнению с углем. В процессе термообработки древесных частиц их прочностные характеристики значительно снижаются, что позволило обобщить результаты исследований зависимостью

$$V^{кр} = (120 + 50 \sqrt{\sin \alpha}) \exp \left[- \left(\frac{t + 273}{273} \right)^{3,225} \left(\frac{m_0 - m}{m_0} \right)^{8,06} 0,0010 \tau \right] + 2,75 + 2 \sqrt{\sin \alpha}. \quad (2)$$

Область допустимого применения данной зависимости: $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$; $1073 \leq T \leq 1373$ К, $\tau > 40$ с.

Взаимодействие частицы с преградой рассматривалось как процесс деформации твердого тела при неупругом ударе, при этом, если нормальная составляющая скорости частицы $V_{норм}$ при ударе больше критической скорости, определенной экспериментально или по эмпирическим уравнениям (1, 2), то такую частицу считали разрушившейся на несколько частиц, количество которых пропорционально отношению $V_{норм}/V^{кр}$. Если $V_{норм} < V^{кр}$, то при взаимодействии частицы с поверхностью во многих случаях в зоне контакта развиваются напряжения, превышающие величину разрушающих напряжений, что вызывает поверхностное разрушение частицы в этой зоне с образованием мелких фракций преимущественно с размером $d_{ч} = 0,2$ мм. Наличие поверхностных трещин, особенно, при горении высоковлажных бурых углей и интинского каменного способствует их поверхностному разрушению с образованием мелких фракций.

Результаты выполненных исследований нашли применение при разработке мероприятий по совершенствованию НТВ-технологии для сжигания немолотых топлив, а также новых высокоэффективных схем, использующих закрученные потоки для сжигания крупнодисперсных биотоплив, а также методики расчета горения полифракционного немолотого топлива в топках НТВ-котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Любов, В.К.* Некоторые особенности поведения крупных фракций твердого топлива при сжигании в низкотемпературном вихре [Текст] / В.К. Любов, Ю.К. Опякин, С.М. Шестаков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТИ ЦБП, 1989. – С. 61–65.
2. *Любов, В.К.* Опыт сжигания высоковлажных отходов промышленности в топке безмельничного котлоагрегата [Текст]: тр. 1-й Рос. нац. конф. по теплообмену / В.К. Любов, В.А. Дьячков, Ф.З. Финкер, И.Б. Кубышкин. – Т. II. Тепломассообмен при хим. превращениях. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – С. 163–168.
3. *Любов, В.К.* Совершенствование топливно-энергетического комплекса путем повышения эффективности сжигания топлив и вовлечения в энергетический баланс отходов переработки биомассы и местного топлива [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук (05.14.04) / В.К. Любов. – Архангельск, 2004. – 44 с.
4. *Любов, В.К.* Характер поведения крупных частиц натурального твердого топлива при различных условиях теплообмена и исследование прогрета угольных частиц [Текст] / В.К. Любов, С.М. Шестаков. – Л., 1982. – 40 с. (Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО).

5. *Любов, В.К.* Экспериментальная установка для изучения процессов термопневморазрушения топливных частиц [Текст]: тр. ПетрГУ / В.К. Любов, В.А. Дьячков. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. – Вып. 2. – С. 39–40.

6. *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. – 14 с. (Рук. деп. в ИНФОРМЭНЕРГО).

7. *Синицын, Н.Н.* Использование процесса термопневморазрушения частиц для повышения эффективности сжигания дробленого топлива в топке ЛПИ [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Синицын Н.Н. – СПб., 1992. – 22 с.

8. *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.

9. *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.

Поступила 25.05.05

Архангельский государственный
технический университет

V.K. Lyubov

Investigation of Thermomechanical Destruction of Solid Fuel Particles

Thermomechanical destruction of solid fuel particles are investigated; the factors effecting the given processes and the most favorable periods of their occurrence are determined; approximating dependences are offered for calculating the critical speed causing destruction of thermostressed fuel particles when they hit the obstacle.
