

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ В ПЫЛЕВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ВЫГОРАНИЯ

Е. А. КОНЬКОВ, И. К. ЛЕБЕДЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры котлостроения и котельных установок)

Важным показателем энергетического твердого топлива является его реакционная способность, под которой в данном случае подразумевается активность взаимодействия с кислородом воздуха при высоких температурах, то есть горючесть. Реакционные свойства в значительной мере определяют кинетику гетерогенного горения и поэтому неизбежно оказывают существенное влияние на динамику всего топочного макропроцесса.

Однако реакционные свойства энергетического топлива весьма слабо изучены. Отсутствует, в частности, какая-либо классификация топлив с точки зрения этих свойств, а также нет достаточно установившихся практических критериев для подобной оценки. Такое положение в известной мере, видимо, связано с тем, что в обычных камерных топках роль кинетических особенностей сжигаемого топлива недостаточно выяснена. В представлениях о работе таких топков основное внимание уделяется значению теплообменных факторов, так что при факельном топливоиспользовании «узким» местом процесса считается не столько скорость выжигания топлива, сколько возможности достаточно быстрого отвода тепла от топочных газов [1]. Это обстоятельство ярко выражается в сложившейся практике инженерного расчета топочных устройств, сводящегося, в сущности, к расчету топки как лучистого теплообменника с практически полным игнорированием ее роли химического реактора.

Не могут считаться надежными и представления о режимных областях реагирования топлива в реальном топочном устройстве, которые также возможно уточнить только на основе достоверных сведений о реакционных свойствах сжигаемого топлива. В соответствующих работах на этот счет имеют место различные представления, вплоть до противоположных. Так, одни авторы рассматривают горение каменноугольного топлива в камерной топке как процесс диффузионный [2], другие исходят из модели горения в промежуточной [3] или кинетической [4] области. Вместе с тем достоверное определение режимной области горения в каждом конкретном случае является одним из определяющих условий для рационального выбора эффективных практических мероприятий по оптимизации работы топки.

Прогресс в области огневых процессов, идущий по пути всемерного повышения теплового напряжения топочных объемов, внедрения в энергетическую практику топочных схем с разделенными во времени процес-

сами выгорания топлива и отвода тепла от дымовых газов (топки с пережимом, циклонные и т. п.), определяет ряд первостепенных научных и инженерных проблем, сопряженных не только с развитием конструкций огневых устройств, но и с дальнейшим более глубоким изучением различных свойств используемых топлив. В этом отношении также большое значение приобретают реакционные (кинетические) свойства, необходимые для расширения пределов практической применимости диффузионно-кинетической теории горения к практике топочных процессов.

Особенности натурального каменноугольного топлива, определяемые его существенной термической неустойчивостью и связанной с этим изменчивостью макромолекулярной и мелкопористой структуры при тепловых воздействиях [5], дают основания по-новому ставить вопрос о реакционных свойствах, а именно: возникает потребность изучать их на разных стадиях выгорания топлива. Желательность постановки такой задачи обосновывается как потребностями дальнейшего углубления в механизм топочного процесса, так и перспективностью внедрения в инженерную практику современной быстродействующей вычислительной техники. Последняя неизбежно потребует представления о различных свойствах топлива не только в виде усредненных за время выгорания величин, но поставит задачу отыскания их в виде непрерывных функций этого процесса. В такой постановке нами рассмотрена кинетика выгорания некоторых бурогоугольных топлив Канско-Ачинского бассейна.

Представление о строении каменноугольного вещества и его термической неустойчивости дает достаточные основания для предположения о непостоянстве реакционных свойств натурального топлива в процессе горения [8]. Однако конкретные закономерности изменения этих свойств могут быть найдены только экспериментально. Весьма сложный характер гетерогенного горения предъявляет к соответствующему эксперименту ряд специфических требований, которые должны обеспечить выявление кинетических свойств в виде объективных характеристик топлива, не усложненных какими-либо случайными факторами из числа особенностей макропроцесса (тепловых, диффузионных, гидродинамических и т. п.). Указанную экспериментальную задачу, как показывает анализ, можно решить, применяя схему взвешенного горения мелкодисперсного топлива, предприняв, однако, специальные меры по термической стабилизации горящего потока. В соответствии с этим, используемая нами экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой вертикальную трубчатую печь с опускным принудительным движением горящего пылевоздушного потока. Специальной конструкции нагреватель (реактор), выполненный из жаростойкой стали в виде трубки малого диаметра с переломом, обогревается электрическим током от однофазного трансформатора низкого напряжения. Термическая стабилизация потока осуществляется сильной баллаستировкой его инертным мелкодисперсным теплоносителем (глинозем или кварцевый песок), причем запыление воздуха балластом осуществляется на более раннем участке по отношению к точке ввода топлива в реакционную печь. Это позволяет подавать топливо в заранее термически стабилизированный балластно-воздушный поток и таким образом практически исключить нестационарный участок температурной кривой прогрева топлива. Специальная опытная проверка показывает, что рассмотренные меры позволяют вести процесс выгорания факела практически в изотермических условиях. Контроль за выгоранием на разных участках реакционной трубки (т. е. в различные моменты процесса) осуществляется с помощью газового анализа методом газо-адсорбционной хроматографии.

Трудности оценки действительной реакционной поверхности в процессе гетерогенного горения общеизвестны. При определении реакционных свойств на различных стадиях выгорания, а особенно в связи с принятым нами способом термической стабилизации факела, приводящим к разбавлению топлива минеральным балластом в десятки крат, эти трудности становятся практически непреодолимыми. Поэтому в качестве

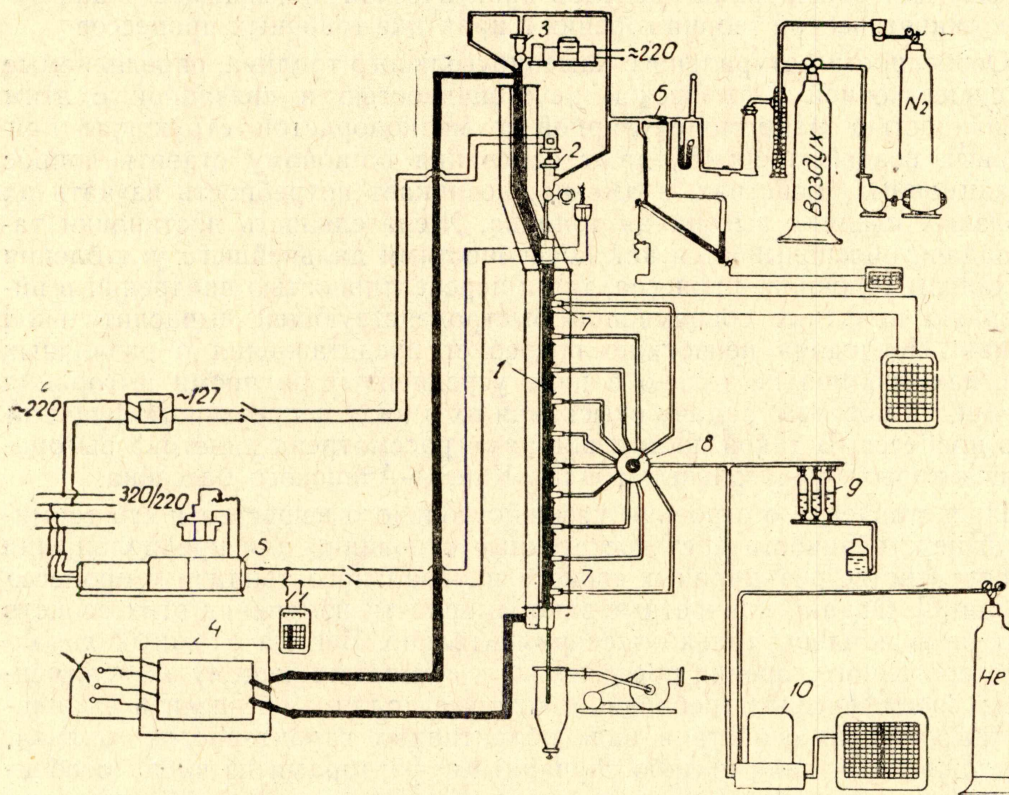


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — нагреватель (реактор); 2 — топливный питатель; 3 — питатель балластного вещества; 4 — силовой трансформатор; 5 — источник постоянного тока; 6 — расходомерное устройство; 7 — термопара; 8 — многоходовый газовый кран; 9 — мокрый аспиратор; 10 — хроматограф ХЛ-3.

критерия реакционной способности принят коэффициент*) относительной весовой скорости горения, аналогичный по смыслу константе внутреннего реагирования [6]. По сравнению с так называемыми истинными кинетическими константами (k_0 и E в уравнении Аррениуса) этот показатель характеризует процесс горения в более общем виде, так как содержит в себе нераскрытую зависимость скорости горения от величины действительной реагирующей поверхности. Однако нетрудно убедиться в том, что этот показатель, определяющий «выходную» (эффективную) скорость процесса, вполне достаточен для кинетических расчетов реальных огневых процессов, а в предельной области чисто кинетического режима он является объективной мерой реактивности топлива.

Таким образом, определение кинетических свойств рассматриваемых топлив заключалось в экспериментальном определении кривых выгорания по длине факела (горящего в чисто кинетическом режиме), опреде-

*) Мы избегаем употребления термина «константа» для обозначения этого критерия, чтобы подчеркнуть его переменный по мере выгорания характер.

лении на этой основе скоростей горения на каждом участке факела и расчете коэффициентов скоростей реагирования для каждого участка по методике, изложенной в [8].

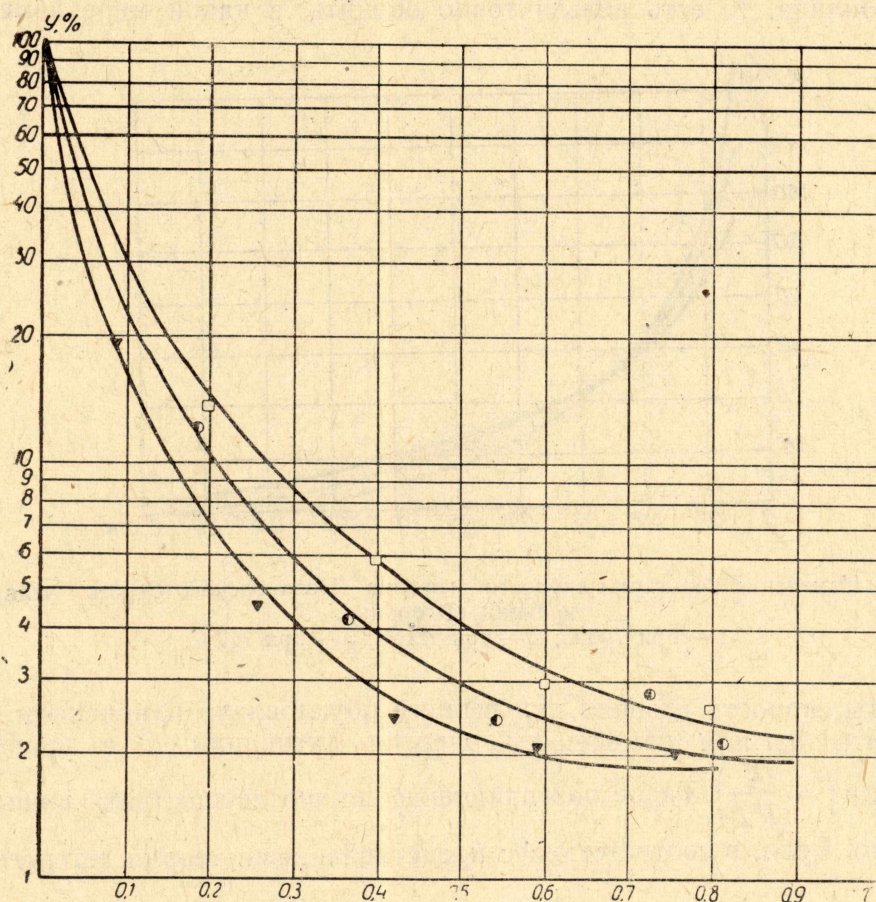


Рис. 2. Выгорание Назаровского бурого угля в зависимости от времени. □ — при температуре 700°C, ● — при температуре 720°C, ▽ — при температуре 747°C; $y = 1 - \Omega$, где Ω — степень выгорания.

Результаты исследования приведены на рис. 2—4. Напомним, что в соответствии с принятой нами методикой определения констант реагирования [8], представление кривой выгорания $\ln(1 - \Omega) = f(\tau)$ в полулогарифмической анаморфозе качественно определяет характер этих констант, а именно: если это представление изображается прямой линией, то реагирование идет при постоянной константе скорости. Наоборот, если указанное представление имеет нелинейный характер, то это соответствует переменной по мере выжига величине константы скорости реагирования. Рис. 2 и 3 показывают, что в действительности имеет место последний случай, то есть коэффициенты скорости горения рассмотренных топлив являются монотонными функциями процесса горения, но отнюдь не постоянными величинами. Такой характер реагирования обнаружен нами для широкой гаммы каменноугольных энергетических топлив. Численные значения констант скоростей горения в каждый момент времени пропорциональны тангенсу угла наклона кривой $\ln(1 - \Omega) = f(\tau)$ в соответствующей точке. Поэтому нахождение производных от этой кривой позволяет определить численные значения коэффициента скорости горения в различные моменты времени (рис. 3) или на разных стадиях выгорания (рис. 4).

Принятый нами показатель кинетической активности не позволяет дать строго обоснованного разграничения роли поверхностных факторов и факторов химического сродства в проявляющихся реакционных свойствах топлива, то есть нельзя точно оценить, в какой мере изменение

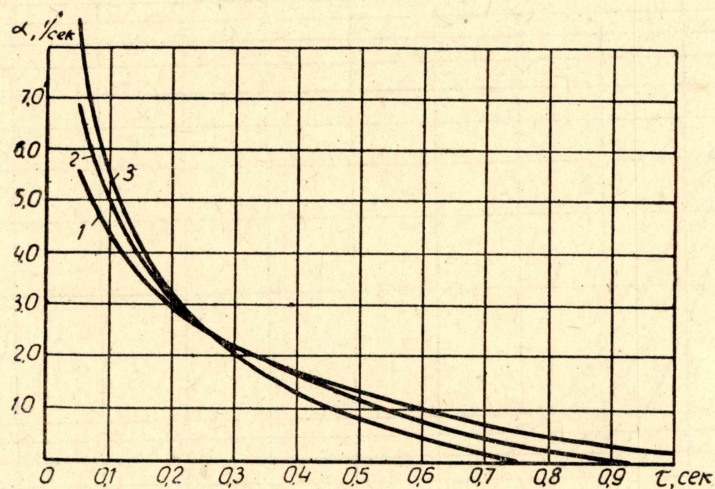


Рис. 3. Изменение константы скорости горения Назаровского бурого угля по времени выгорания.
1 — при 700°C; 2 — при 720°C; 3 — при 747°C.

константы скорости горения при выжиге обусловлено изменением предэкспоненты α_0 или изменением энергии активации E в уравнении $\alpha = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$. Такое разграничение можно осуществить лишь приближенно. Если, в соответствии с представлениями теории гетерогенной

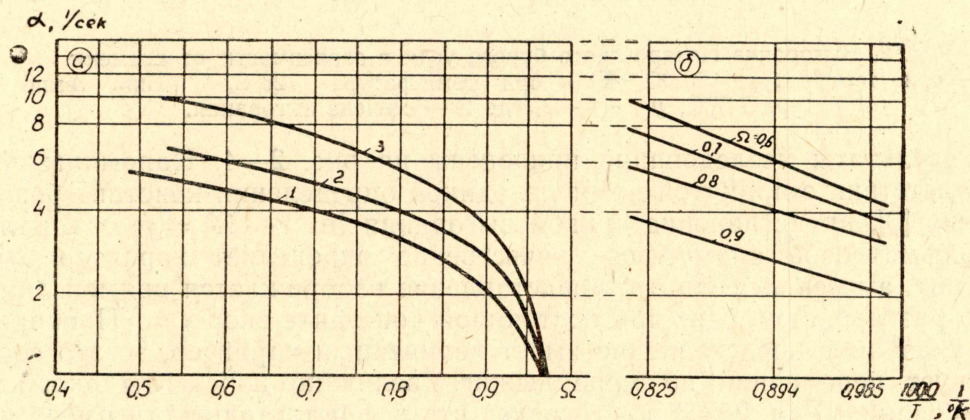


Рис. 4. Зависимость константы скорости горения Назаровского бурого угля от степени выгорания (а) и температуры (б). 1, 2, 3 — то же, что на рис. 3.

кинетики и катализа [7] [4] толковать α_0 как функцию количества реакционноспособных центров (поверхностная функция), а E — как функцию химического сродства (энергетический фактор), то из рис. 4 можно сделать вывод о преобладающей роли поверхностной функции (α_0 сильно зависит от степени выгорания) и менее выраженной изменчивости активационных факторов (E в зависимости от степени выгорания меняется незначительно (рис. 4, б). На основании этого возможен вывод о том,

что в процессе горения, видимо, более заметным является процесс изменения (расходования) количества реакционноспособных сростков, в то время как активность этих сростков меняется меньше.

Независимость энергии активации от степени выгорания на поздних стадиях реагирования формованных топлив обнаружена также В. Петерсом [9]. Однако поскольку эта работа проводилась при условиях, существенно отличающихся от наших, то сравнение полученных нами результатов с работой [9] не может быть сделано непосредственно.

Выводы

1. Изменчивость кинетических констант натурального топлива по мере выгорания, обосновываемая современными представлениями о его макромолекулярном и мелкопористом строении, а также механизмом тепловых воздействий подтверждается экспериментально.

2. Границы режимных областей реагирования натурального топлива в топочном устройстве со взвешенным горением топливных частиц должны иметь нестабильный характер. Падение кинетической активности топлива совместно с уменьшением размера топливных частиц при выгорании должно быстро смещать топочный процесс в сторону кинетического режима.

3. Соответственно этому для интенсификации работы топок, использующих угли Канско-Ачинского бассейна, представляются желательными меры, приводящие к повышению температурных уровней процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Тагер. Проблемы современной топочной техники и задачи научных исследований. Теплоэнергетика, № 9, 1965.
 2. А. Б. Резняков. Горение пылеугольного факела как полидисперсной системы. Алма-Ата, 1958.
 3. В. В. Померанцев, С. Л. Шагалова, К. М. Арефьев. Приближенная методика расчета выгорания пылеугольного факела. Теплоэнергетика, № 11, 1958.
 4. И. А. Яворский. Вопросы теории горения ископаемых углей и интенсификация их воспламенения. Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1961.
 5. З. Ф. Чуханов. Некоторые проблемы топлива и энергетики. Изд. АН СССР, М., 1961.
 6. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. Изд. МГУ, 1957.
 7. Г. М. Панченко, В. П. Лебедев. Химическая кинетика и катализ. Изд. МГУ, 1961.
 8. Е. А. Коньков. О расчете кинетических констант изотермического пылеугольного факела на различных стадиях выгорания. Изв. ТПИ, т. 139, 1965.
 9. W. Peters, I. Langhoff. Brennstoff-Chemie, Bd 44, N 2, 1963.
-