

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОГО ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

Факельное комбинированное сжигание традиционного газообразного топлива с диспергированными в поток частицами твердого топлива является эффективным методом, позволяющим получать полное сгорание с низким эмиссионным уровнем. Предложенная методика организации горения многофазного турбулентного потока топлива в топках сложной геометрии позволяет рассчитать оптимальную концентрацию твердотопливных частиц в суппортивном потоке горючего газа.

В результате интенсивного включения в глобальную экономику стран, в недавнем прошлом имевших автономные рынки как производства, так и потребления, и в то же время дезинтеграции энергогенерирующих мощностей, выравнивания цен на энергоносители до общемирового уровня, и, как следствие, обострения конкуренции даже для энергоемкой продукции, других экономических факторов, - все более возрастает интерес не только бытовых потребителей, но и крупных промышленных предприятий и целых отраслей в использовании альтернативных видов топлива. Однако сжигание таких видов топлива ограничено рядом технических, технологических, экологических и структурно-социальных факторов. По этим причинам промышленность заинтересована в развитии технологий и разработке эффективных технических устройств для комбинированного сжигания различных видов альтернативного топлива, позволяющих придерживаться высоких требований к современным технологическим процессам – с одной стороны, и к возрастающим экологическим стандартам – с другой стороны.

Программа развития подобных технологий и конструирование новых устройств должна включать комплекс методов термодинамического анализа, вычислительной гидродинамики, экспериментальной и теоретической аэродинамики течений с горением.

Одним из путей замещения горючего газа в промышленности и энергетике является переход на традиционные (угольное топливо, торф, древесина) и нетрадиционные (бытовые и промышленные отходы) виды твердого топлива. Широко применяемые сегодня методы сжигания имеют собственные особенности и, как следствие, достоинства и недостатки: прямое сжигание имеет низкую эффективность и высокий уровень эмиссии отходов горения в дымовых газах; сжигание в кипящем слое приводит к значительному избытку окислителя и, как следствие, сниженной температуре пламени и увеличению теплообменных поверхностей, а также повышению эксплуатационных затрат; газификация с последующим сжиганием во вторичной камере значительно увеличивает металлоемкость топок, а,

следовательно, и капитальных вложений; сепаратное сжигание пылевидного топлива хоть является достаточно эффективным, однако требует организации сложных турбулентных потоков, что значительно усложняет комплекс требуемого оборудования.

Наиболее эффективным представляется факельное комбинированное сжигание традиционного топлива (прежде всего, горючих газов) с диспергированными в поток частицами твердого топлива. Организация такого метода сжигания имеет ряд несомненных преимуществ: традиционная система воспламенения; низкие значения коэффициента избытка воздуха, а, следовательно, высокую температуру пламени, малые объемы уходящих газов, габаритные размеры топки, низкий эмиссионный уровень и т.д. Кроме того, этот метод горения можно осуществлять в топках традиционных теплогенерирующих агрегатов, что делает этот метод сжигания твердых частиц единственно возможным без замены топочного оборудования.

Методологические аспекты организации такого типа горения ставят ряд задач, которые необходимо решать как для расчета лимитирующих показателей: максимального размера частиц и рабочего диапазона концентрации их в потоке суппортирующего топлива в зависимости от химических и физических свойств (скорости горения, влажности, температуры вспышки, скорости витания и т.п.), геометрии и аэродинамического сопротивления топочной камеры, теплоты сгорания обоих видов топлива, так и для расчета рабочих параметров (расчетной тепловой мощности теплогенерирующего агрегата; объема дымовых газов, требуемого расхода воздуха и т.п.).

В случае турбулентных диффузионных факелов пламени процесс сгорания определяется структурой потока и смешением. Применяемые методы расчета основаны на законах подобия турбулентных струй, теории потока в гомогенном реакторе и на полных уравнениях в частных производных для турбулентного течения. При сгорании капель и частиц необходимо учитывать скорости гетерогенных реакций и требуется знать распределения частиц по размерам и в пространстве. Эмиссия загрязняющих веществ, таких, как углеводороды, сажа и оксиды азота, может быть уменьшена соответствующим управлением закономерностями изменения температуры и концентрации в области сгорания. Также необходимо учитывать расчетный лучистый поток тепла от пламени к тепловым стокам (модель с идеальным перемешиванием, модель длинной топки, многоструйная модель, зонный метод анализа).

В течениях с горением влияние тангенциальных потоков подаваемого воздуха и топлива направлено на стабилизацию высокоинтенсивных процессов эффективного чистого сгорания.

Течения с существенной тангенциальной составляющей являются результатом сообщения потоку спирального движения с помощью тангенциальной подачи сред в камеру с формированием окружной компоненты скорости.

Экспериментальные исследования показывают, что спиральное движение оказывает существенное влияние на поле течения: на расширение струи,

процессы перемешивания и затухания скорости в струе (в случае инертных струй), на размеры, форму и устойчивость факела пламени и, собственно, на интенсивность горения (в случае реагирующих потоков). На все эти характеристики влияет интенсивность окружной компоненты скорости, которая характеризуется параметром закрутки, представляющим собой безразмерное отношение осевой компоненты потока момента количества движения к произведению осевой компоненты потока количества движения и эквивалентного радиуса сопла, т. е.

$$S = \frac{G_\theta}{G_x} \left(\frac{d}{2} \right), \quad (1)$$

где величина

$$G_\theta = \int_0^\infty (\rho u w + \overline{\rho u' w'}) r^2 dr, \quad (2)$$

является потоком момента количества движения в осевом направлении и учитывает вклад $x - \theta$ -компоненты турбулентного сдвигового напряжения; а величина

$$G_x = \int_0^\infty [\rho u^2 + \overline{\rho u'^2} + (\rho - \rho_\infty)] r dr, \quad (3)$$

является потоком количества движения в осевом направлении и учитывает вклад турбулентного нормального напряжения и давления (осевая тяга), $d/2$ —радиус сопла, u, v, ω - компоненты скорости в направлении осей x, r, θ цилиндрической системы координат.

В свободной струе, распространяющейся в затопленном пространстве, величины G_x и G_θ постоянны, т. е. являются инвариантами для данной струи.

Если использовать уравнение для количества движения в радиальном направлении и пренебречь слагаемыми $\overline{u'^2} - (\overline{w'^2} + \overline{v'^2})/2$, то вклад давления в G_x можно выразить через ω следующим образом:

$$G_x = \int_0^\infty \rho [u^2 + (w^2 - w_{m0}^2)/2] r dr, \quad (4).$$

Рассмотрим случай, когда поток закручен как целое на выходе из сопла, т.е.

$$u(r) = u_{m0}, \quad w(r) = w_{m0}(2r/d), \quad (5).$$

Таким образом, профиль осевой скорости и считается равномерным, а скорость закрутки ω возрастает от 0 (при $r=0$) до $\omega m0$ (при $r=d/2$, т.е. на стенке сопла). Если вклад давления в G_x сводится к учету слагаемого $\omega^2/2$, а турбулентными напряжениями пренебречь, тогда:

$$G_\theta = \frac{\pi}{2} \rho u_{m0} w_{m0} (d/2)^3, \quad G_x = \frac{\pi}{2} \rho u_{m0}^2 (d/2)^2 [1 - (G/2)^2], \quad (6)$$

где $G_x = \omega m0 / u_{m0}$ - отношение максимальных скоростей в выходном сечении сопла. Таким образом, параметр закрутки S может быть представлен в виде

$$S = \frac{G/2}{1 - (G/2)^2}, \quad (7).$$

Течение может быть также охарактеризовано локальным параметром закрутки S_x , в котором используется толщина слоя смешения rb , а не радиус сопла $d/2$. Кроме того, закрутка потока может выражаться непосредственно через угол установки лопаток закручивающего аппарата и геометрические параметры сопла, через тягу и вращающий момент закручивающего устройства, через угол расширения струи вниз по потоку от сопла и через другие параметры.

Принципиальная общая схема

Каналы подачи топлива располагаются внутри осевых и тангенциальных (генерирующих вихревые потоки) каналов подачи воздуха и вокруг стабилизатора (при использовании распыленного топлива, газа и т.п.) или в центре стабилизатора (при использовании жидких видов топлива, альтернативного твердого топлива и жидких видов топлива и газа при подаче с помощью распылителя). Такая схема обеспечивает:

- образование реверсивных завихрений у корня факела пламени, которые обеспечивают его абсолютную стабильность даже в холодной топке;
- управление формой факела пламени;
- насыщение факела пламени топливом (за счет аэродинамического захвата);
- создание в центральной части факела пламени условий, способствующих значительному сокращению образования окисей азота.

Наиболее эффективным представляется использование двух независимых каналов подачи первичного воздуха с регулировкой сечения выходного отверстия.

Через осевой канал подачи первичного воздуха воздух эффективно подавать на высокой скорости, что обеспечивает узкую направленность потока.

Через тангенциальный (генерирующий вихревые потоки) канал подачи первичного воздуха воздух эффективно подавать на высокой скорости с завихрением потока.

Регулирование распределения подаваемого воздуха между этими двумя каналами позволяет оптимизировать форму факела пламени в зависимости от геометрии топки и запроса на тепло (мощность).

В результате исследований доказано, что для случая турбулентных диффузионных факелов пламени процесс сгорания комбинированного многофазного топлива определяется структурой потока и условиями смешения различных видов топлива и распределенных потоков окислителя. Определено, что соотношение подводимого на горение воздуха по осевому и тангенциальному каналам определяет форму факела пламени, его размеры и интенсивность процессов, что позволяет эффективно оптимизировать технологические параметры.

Таким образом, можно утверждать, что многоканальная схема подачи разных видов топлива и организация двух независимых потоков воздуха

(осевого и тангенциального) представляется наиболее оптимальной при комбинированном сжигании различных видов органического топлива.

Проведен термодинамический анализ процессов горения комбинированного многофазного топлива в турбулентных потоках камер сгорания сложной геометрии. Разработана математическая модель газодинамических развитых турбулентных потоков в камерах сгорания сложной геометрии, включающая систему дифференциальных уравнений движения турбулентных комбинированных газовых потоков, уравнение энергии и кинетическое уравнение горения. Проведен численный эксперимент, позволяющий установить оптимальные параметры стабильного функционирования процессов горения без отрыва пламени с вторичными турбулентными потоками, обеспечивающими значительное снижение вредных веществ (NO_x , CO , SO_x и др.) в дымовых газах. В результате проведенных исследований разработана методика, позволяющая в оперативном режиме проводить пуско-наладочные работы для организации стабильного и чистого горения многофазного топлива в камерах сгорания сложной геометрии.

Дальнейшие исследования (натурный и численный эксперименты, развитие теории комбинированного горения) позволят оперативно рассчитывать, а впоследствии и оптимально дозировать, твердое дисперсное топливо в суппортирующий поток горючего газа в зависимости от ряда вышеприведенных характеристик, для полного сгорания с низким уровнем эмиссии в определенных топочных камерах.

Annotation

Co-firing of solid fuel particles dispersed in a stream of the traditional fuel gas is an effective method that allows to obtain complete combustion with low emission levels. The proposed method of the organization of multiphase fuel turbulent flow burning inside of the complex geometry furnaces allows to calculate the optimal concentration of the solid particles in the supported fuel gas stream.