

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ФАКЕЛЬНЫМ ГОРЕНИЕМ В КОТЛЕ

В настоящее время в результате переработки нефти одним из продуктов является попутный газ, представляющий собой смесь газов (метан, пропан, бутан), концентрация которых постоянно изменяется. Этот газ сжигается в виде факела в атмосферу. По выбросам вредных веществ в атмосферу нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность занимает примерно шестое место среди других отраслей. Поэтому работы по утилизации выброса (попутного газа) и одновременно глубокой переработки нефтепродуктов являются актуальными. Так, на судах-газовозах существует проблема выбросов, связанная с поддержанием постоянного давления в танках. При повышении температуры происходит выброс в окружающую среду избыточного газа. Поэтому работы по утилизации представляют практический интерес.

Если в результате использования смеси меняется концентрация и скорость газа, то на судах меняется только скорость, что влияет на температуру сгорания. Добиться экономии топлива (температуры сгорания) возможно путем регулирования параметров факела, поддерживая оптимальную конфигурацию (форму и длину) пламени в конкретном топочном пространстве.

Данное исследование посвящено обоснованию способа управления факельным горением.

Управление процессом сжигания газового топлива в камере сгорания тесно связано с вопросом о возможности возникновения составного факела [1]. Газовые факелы разделяют на ламинарные и турбулентные [2, 3].

Модель ламинарного факела предлагает наличие "холодного конуса" [2, 3], ограниченного фронтом пламени, при этом фронт пламени может рассматриваться как зона конечной протяженности.

Принципиальное отличие турбулентного факела от ламинарного состоит в том, что из-за наличия в аэродинамической структуре потока турбулентных вихрей и пульсаций фронт пламени теряет четкие границы. Геометрическая форма и размеры турбулентного факела определяются иначе, чем для ламинарного факела.

Турбулиизация газового факела определяется двумя факторами [2, 3]:

характером течения (ламинарным или турбулентным) струи горячей смеси в горелке;

устойчивостью фронта ламинарного пламени.

Из работы [5, 6, 7] известно, что длина  $\Lambda$  образующей конуса ламинарного пламени зависит от величины факела  $l_\phi$ :

$$\Lambda = \sqrt{l_\phi^2 + \frac{d_0^2}{4}},$$

где  $d_0$  – размер насадки.

Возможность развития неустойчивости и перехода процесса факельного горения к турбулентности определяется соотношением между длиной волны  $\lambda_m$  максимально быстро нарастающего со временем возмущения, алгоритм определения которой приведен в работах [7, 8], и длиной  $\Lambda$  образующей конуса пламени. Возможны три принципиально различные ситуации.

Если  $\lambda_m > \Lambda$ , то неустойчивость не имеет места (возмущения с неустойчивыми длинами волн не могут реализоваться из-за ограниченности длины фронта пламени) и автотурбулизация горения не происходит.

Если  $\lambda_m \approx \Lambda$ , то неустойчивость, скорее всего, проявляется не в автотурбулизации пламени, а в искажении геометрической формы его фронта. Фронт пламени в плоском сечении принимает дугообразные формы, – при этом геометрические параметры дуг определяются длиной волны  $\lambda_m$ , – однако само пламя остается ламинарным. "Холодный конус" в этом случае принимает тюльпановидную форму, причем максимальный поперечный размер "тюльпана" ненамного превосходит диаметр насадка  $d_0$ .

И, наконец, если  $\lambda_m \leq \Lambda$ , то пламя неустойчиво и факел становится турбулентным. Максимальный поперечный размер турбулентного факела может существенно превосходить диаметр  $d_0$ .

Поперечный (максимальный) размер турбулентного факела и его геометрическая форма определяются, в первую очередь, степенью (масштабом) турбулентности [2, 3], т.е. параметром, который напрямую зависит от длины волны  $\lambda_m$  максимально быстро нарастающего со временем возмущения фронта пламени. Если турбулентность слабая и мелкомасштабная, то форма турбулентного факела напоминает тюльпановидный фронт пламени [1] с "размытыми" границами.

Управление отдельным факелом осуществляется путем поддержания горения в ламинарном или в турбулентном режиме (в зависимости от цели управления), при этом также регулируется максимальный поперечный размер факела.

Ламинарность струи горючего может быть гарантирована:

высокой скоростью подачи горючей смеси;  
небольшим размером насадки  $d_0$ .

Скорость подачи горючей смеси может относительно легко изменяться в оперативном режиме. Размер насадки  $d_0$ , как правило, задается на этапе проектирования горелки, хотя современные технологии допускают оперативное регулирование данной величины.

Коэффициент кинематической вязкости исходной горючей смеси, который тоже влияет на ламинарность струйного потока, является плохо регулируемым параметром.

Ламинарность факела в целом обеспечивается ламинарностью струи горючего в сочетании с устойчивостью пламени либо с большой длиной волны  $\lambda_m$  максимально быстро нарастающего со временем возмущения неустойчивого пламени. Длина волны  $\lambda_m$  максимально быстро нарастающего со временем возмущения регулируется главным образом составом горючей смеси, которая может оперативно обогащаться или обедняться горючим, кроме того, возможно принципиальное изменение состава горючей смеси.

Очевидно, что если все факелы в камере сгорания ламинарные, то режим сомкнутого горения в принципе невозможен. Поэтому, регулируя состояние каждого отдельного факела можно поддерживать режим разомкнутого горения или, наоборот, создавать составной турбулентный факел [2]. Следовательно, чрезвычайно важным с точки зрения возможности образования составного факела представляется вопрос о турбулизации ламинарного факела.

Предположим, что все горелки на передней стенке камеры сгорания одинаковы с точки зрения их геометрии и одновременно функционируют в одном и том же режиме турбулентного горения, т.е. образующиеся факелы абсолютно идентичны. Тогда, если максимальный поперечный размер факела превосходит расстояние между соседними горелками или очень близок к этому расстоянию, то имеет место режим сомкнутого горения, т.е. образуется составной факел. Если горелки распределены по передней стенке топки неравномерно, то единый составной факел может и не возникнуть, но возможно появление составных факелов (режимы сомкнутого горения) между отдельными группами горелок.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Регулирование образования составного турбулентного факела в камере сгорания возможно путем управления отдельными факелами.

2. Управление отдельным факелом может осуществляться за счет регулирования:

скорости подачи горючей смеси;

количественного и качественного состава горючей смеси;

размера насадки  $d_0$  (что не всегда возможно в оперативном режиме).

3. Регулированием длины волны  $\lambda_m$  максимально быстро нарастающего со временем экспоненциального возмущения [6, 9] фронта пламени можно управлять масштабом и интенсивностью турбулентности.

4. Так как при повышенной интенсивности турбулентности низкочастотные пульсации (существенно повышающие интенсивность турбулентного обмена) значительно влияют на аэродинамику турбулентного факела, то представляется возможным направленное регулирование характеристик газового факела путем изменения уровня турбулентности. Поэтому – в зависимости от цели управления (поддержание заданной скорости горения, обеспечение полноты сгорания топлива, минимизация вредных выбросов и т.п.) – можно добиваться либо интенсификации процесса горения, либо снижения температуры и полноты сгорания.

5. Имеется возможность поддержания режима разомкнутого или режима сомкнутого горения (опять-таки в зависимости от цели управления) одним из двух способов:

регулированием типа горения (ламинарное, со слабой турбулентностью, с развитой турбулентностью) каждого отдельного (элементарного) факела;

прекращением или возобновлением подачи топлива в отдельные горелки ("выключением" и "включением" горелок).

Дальнейшие исследования целесообразно направить на моделирование системы управления факелом с целью оптимизации параметров горения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко А.В., Волков В.Э., Максимов М.В. Проблема устойчивости конденсационных скачков //Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса, 2013. – Вип. 44. - Т. 1. – С. 287 - 293.

2. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. – Л.: Энергия.– 1978. – 216 с.

3. Крыжановский Ю.В., Крыжановский В.Н. Структура и расчет газового факела. – К.: Освіта України, 2012. – 96 с.

4. Натанзон М.С. Неустойчивость горения. – М.: Машиностроение, 1984. – 526 с.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т.: Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 736 с.

6. Ландау Л.Д. К теории медленного горения //Журнал экспери-

ментальной и теоретической физики, 1944. – Т. 14. - №6. – С. 240 - 244.

7. Асланов С.К., Волков В.Э. Интегральный метод анализа устойчивости ламинарного пламени. //Физика горения и взрыва. - 1991. - №5. – С. 160 - 166.

8. Aslanov S., Volkov V. On the Instability and Cell Structure of Flames. – Archivum combustionis. 1992. - Vol. 12. 1 – 4. – P. 81 - 90.

9. Волков В.Э., Рыбина О.Б. Об устойчивости плоской стационарной волны медленного горения в сжимаемой среде. //Дисперсные системы. XXI научная конференция стран СНГ 20 - 24 сентября: тезисы докладов. – Одесса: Астропринт, 2004. – С. 75 - 76.