УДК 621.438:662.767:532.517.4

ВЫГОРАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ И РАЗОГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

Гичёв Ю.А., Ступак М.Ю.

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ

Путем математического моделирования выполнен анализ выгорания газообразного топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей. Установлено влияние пульсаций на режим выгорания топлива. Результаты исследования могут быть использованы для выбора уровня углубления горелки в ковш и режима подачи газовоздушной смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа касается процессов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей при пульсационном сжигании топлива [1]. Пульсации вносят значительные коррективы в процесс выгорания топлива: влияют на конфигурацию и размеры факела, изменяют распределение температуры в факеле и прочее. При сушке и разогреве ковшей непосредственно факелом выгорающего топлива, эти изменения определяют конструктивные решения и эксплуатационные режимы термообработки ковшей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При описании процесса пульсационного горения целесообразно использовать понятие об образовании вихрей в турбулентном факеле, размеры и поведение которых в значительной степени определяют характер горения топлива. Трансформация вихрей под воздействием пульсаций является сутью влияния пульсации на процесс горения, так как именно вихри представляются носителями пульсаций внутри турбулентного факела.

По существующим представлениям турбулентный поток при больших числах Re состоит из вихрей различного масштаба, причем самые крупные из вихрей (макровихри) характеризуются масштабом течения, а самые мелкие (микровихри) определяются условиями естественной и искусственной турбулизации потока. Передача энергии происходит от более крупных вихрей к менее крупным. Выгорание газообразного топлива в объеме микровихрей происходит практически мгновенно, а в объеме макровихрей с запаздыванием, что приводит к неполноте сгорания и снижению температуры горения. В связи с этим эффект горения и конфигурация факела связаны с условием создания оптимального масштаба турбулентных вихрей.

При описании характера образования микровихрей наиболее продуктивным является представление об образовании микровихрей в результате отрыва потока с поверхности канала. Например, в работе [2] экспериментально подтверждена теория образования вихрей в пограничном подслое и влияние шероховатости стенки на масштаб турбулентных вихрей. Картина образования турбулентных вихрей от шероховатости стенки представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 приведены импульсные шлирен-фотографии горящего факела [3, 4] в обычном режиме и с наложением пульсаций.

Из сравнения данных, приведенных на рисунке 2, следует, что при воздействии на факел пульсаций происходит изменение структуры факела и характера горения в целом, что выражается в сокращении, примерно в два раза, протяженности ядра факела (l_1) по

© Гичёв Ю.А., Ступак М.Ю.

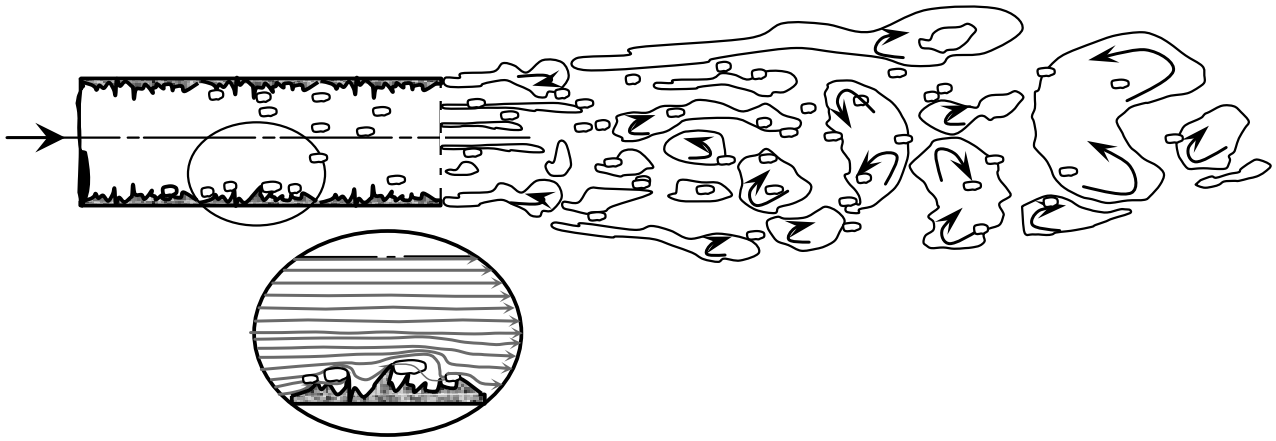

Рис.1 Образование турбулентных вихрей.

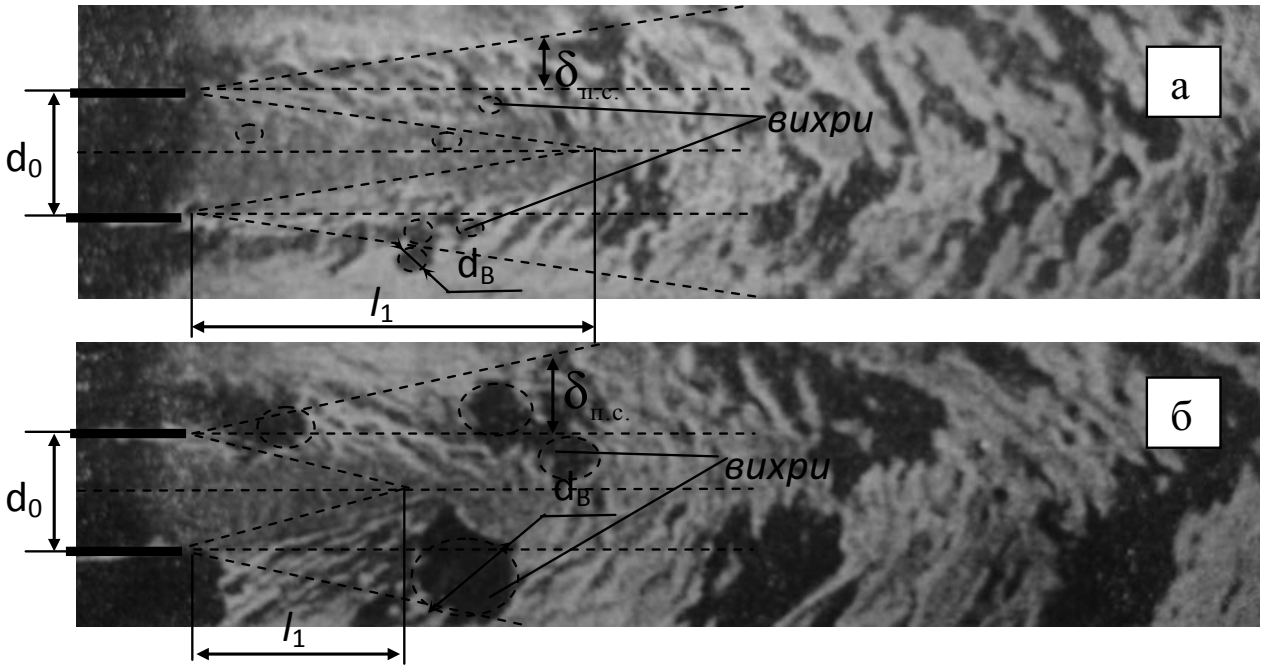

Рис.2 Структура турбулентного диффузионного факела при обычном режиме горения (а) и под воздействием пульсаций (б).

сравнению с обычным режимом горения, в расширении пограничного слоя ($\delta_{п.с.}$), а также в трансформации процесса вихреобразования, сопровождающегося изменением диаметра вихрей ($d_в$).

Сгорание вихрей сопровождается звуковым эффектом со спектром частот и амплитуд, зависящим от их размеров. При этом частота звукового эффекта вычисляется соотношением:

$$\nu_ф = u_ф / d_в, \quad Гц \qquad (1)$$

где $u_ф$ - скорость продвижения фронта горения в газовоздушной смеси, м/с.

Задача данной работы заключалась в аналитическом анализе процесса выгорания газообразного топлива с использованием понятия вихреобразования в турбулентном факеле и характера их поведения в процессе горения топлива.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫГОРАНИЯ

Образование турбулентных вихрей и схема выгорания газообразного топлива при пульсационном сжигании топлива представлены на рисунке 3.

Скорость одиночного вихря в потоке вязкой жидкости определяется выражением [5]:

$$u = \frac{\Gamma}{\pi \cdot d_B} \cdot (1 - e^{-\frac{d_B^2}{16\upsilon\tau}}), \qquad (1)$$

где Г – циркуляция вихря, м²/с; $d_в$ – диаметр вихря; τ – время присутствия вихря в потоке, с; υ – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Принимая во внимание, что периферийная скорость вихря равна скорости потока, выражение для циркуляции вихря определяется произведением:

$$\Gamma = \pi \cdot d_B \cdot u_{CP}, \qquad (2)$$

где $u_{ср}$ – средняя скорость потока, м/с.

Соответственно выражение (1) принимает вид:

$$u = u_{CP} \cdot (1 - e^{-\frac{d_B^2}{16\upsilon\tau}}). \qquad (3)$$

Совместное решение уравнений движения и неразрывности дает следующее выражение:

$$u_\Phi + \left(\frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} \cdot x + u_{CP} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2 d_B}} \right) + \frac{\left(\left(\frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} - u_{CP} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{2 \cdot d_B} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2 d_B}} \right) \cdot \rho \cdot e^{-\zeta \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{2 \cdot d_B \cdot \rho_0 \cdot c_P} \tau} \right)}{\partial\rho / \partial x} = 0. \qquad (4)$$

где $u_ф$ – скорость распространения фронта горения, м/с; $\lambda_Г$ – локальный коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый значением числа Re [5]; ρ – плотность газовоздушной смеси, кг/м³; ζ – эмпирическая постоянная, являющаяся среднестатистической для факельного горения.

Интенсивность выгорания газа по длине факела, а, следовательно, и концентрация газа определялась по изменению плотности газовоздушной смеси. При этом изменение концентрации газа подчинялось уравнению $C = C_0 \cdot e^{-\chi \cdot x}$. Значение показателя степени χ, позволяющего учесть размеры вихрей, определяется из решения уравнения (4):

$$\chi = \frac{\left(\frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} - u_{CP} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{2 d_B} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2 d_B}} \right) \cdot e^{-\zeta \frac{3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{2 \cdot d_B \cdot \rho_0 \cdot c_P} \tau}}{u_\Phi + \left(\frac{d_B}{8 \cdot u_\Phi \cdot \tau_K^2} \cdot x + u_{CP} \cdot e^{-\frac{\lambda_\Gamma x}{2 d_B}} \right)}. \qquad (5)$$

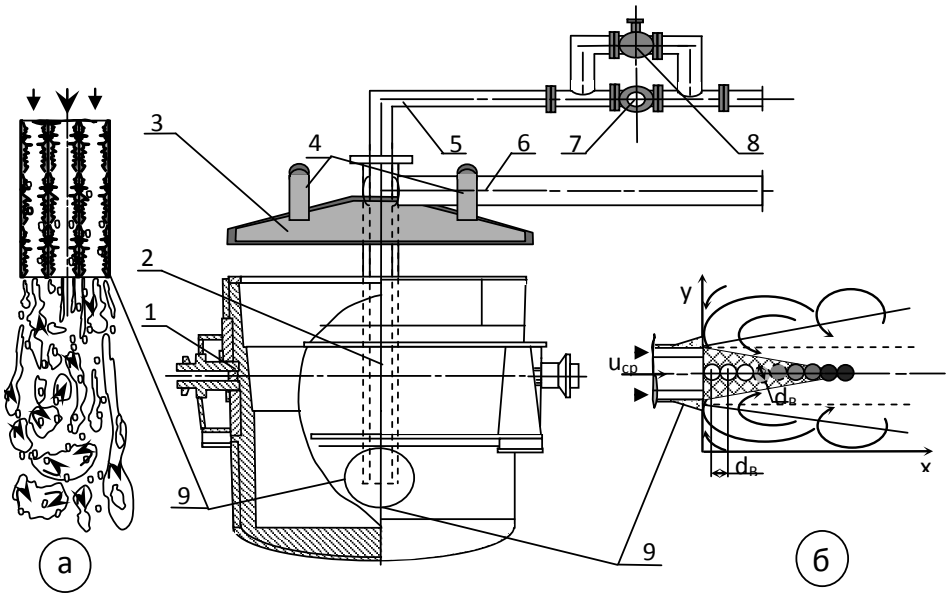

Рис.3 Образование турбулентных вихрей (а) и схема выгорания газообразного топлива (б). 1 – ковш; 2 – горелка; 3 – крышка ковша; 4 – отвод продуктов сгорания; 5 – подвод природного газа; 6 – подвод воздуха; 7 – пульсатор с электродвигателем; 8 – байпас с клапаном; 9 – выходное сечение горелки типа труба в трубе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета изменения относительной концентрации горючего газа по длине факела [6], представленные на рисунке 4, позволяют отметить следующее.

Для горелок, применяемых на стендах сушки и разогрева сталеразливочных ковшей с учетом шероховатости труб горелок, диаметры образующихся вихрей ($d_в$) в потоках «газ-воздух» составляют до 5 мм. Это указывает на то, что при пульсационном горении по данным расчета полное выгорание газа происходит на расстоянии двух калибров от среза горелки, т.е. уже в нижней части ковша, исключая этим недожог топлива.

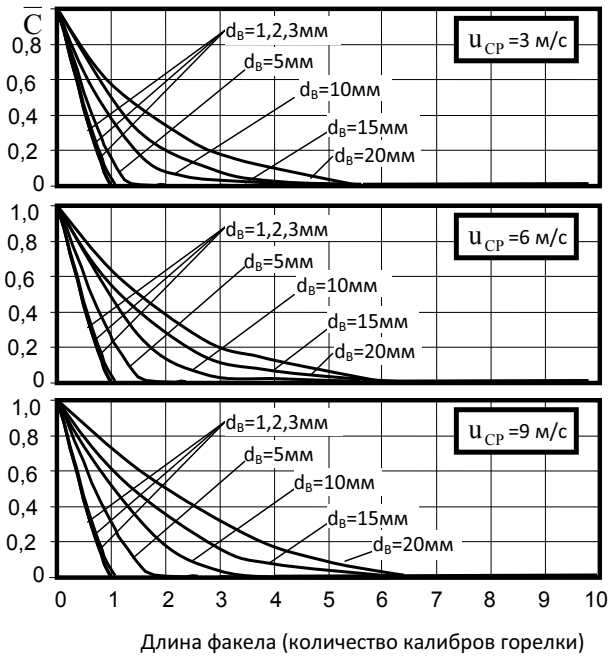

Рис.2 Изменение относительной концентрации горючего газа по длине факела.

ВЫВОДЫ

Путем математического моделирования выполнен анализ выгорания газообразного топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей. Установлено влияние пульсаций на режим выгорания топлива. Результаты исследования могут быть использованы для выбора уровня углубления горелки в ковш и режима подачи газовоздушной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гичёв Ю.А., Ступак М.Ю. Опытно-промышленное опробование пульсационного сжигания топлива при сушке и разогреве сталеразливочных ковшей.// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. - №7. - С. 176-177.
2. Власов Е.В., Гиневский А.С., Каравосов Р.К. Влияние начальных условий истечения на аэродинамический характеристики турбулентных струй // Сборник научных трудов «Механика неоднородных турбулентных потоков». - М.: Наука, 1989. – С. 27-34.
3. Дорошенко В.Е., Фурлетов В.И. О воздействии звука на турбулентное пламя // Физика горения и взрыва. - 1969. - Т. 5. - №1. – С. 114-125.
4. Адаменко Д.С. Повышение эффективности работы котельных агрегатов путем пульсационно-акустического сжигания топлива: дис. канд. техн. наук: 05.14.06. – Днепропетровск, 2008 – 139с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
6. Гичёв Ю.А., Адаменко Д.С., Коваль К.М. Моделирование теплових и газодинамических процес сов в топке парового котла // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Днепропетровск: «ПП Грек О.С.», 2006. – С. 53-67.