

---

УДК 536.46

### Особенности технологий, использующих реакции горения

Ермолаева В.А.

В статье подробно рассмотрены физические и химические процессы, сопровождающие реакции горения, отличительные особенности процессов горения, наличие значительного экзотермического эффекта, скорость основных химических реакций в процессе горения, сложность окислительно-восстановительных процессов. Рассмотрены виды окислителей, соотношение горючего и окислителя, условия, необходимые для начала реакции горения, обязательное самоускорение реакции в системе, гомогенное и гетерогенное, ламинарное и турбулентное горение. Рассчитан материальный баланс при полном и неполном сгорании топлива. Охарактеризованы данные, необходимые для определения и расчета рассеивания выбросов вредных веществ, образующихся в реакциях горения, для расчета максимальных приземных концентраций при выбросе газовой смеси из одиночного источника. Возможен расчет расстояния от источника выбросов, на котором приземная концентрация загрязняющих веществ достигает максимального значения.

*Ключевые слова:* горение, физические и химические особенности реакций горения.

### Special aspects of technologies employing a combustion reaction

Ermolaeva V.A.

The paper details the physical and chemical processes resulting from the combustion reaction as well as the distinctive features of combustion processes, the presence of a significant exothermic effect, the speed of the basic chemical reactions in the combustion process and the sophistication of redox processes. The paper presents the types of oxidizing agents, the fuel-oxidant ratio, the conditions essential for initiating the combustion reaction, the required auto-acceleration of the reaction in the system, as well as homogeneous and heterogeneous, laminar and turbulent combustion. The material balance under complete and incomplete fuel combustion is calculated. The paper characterizes the data required for defining and calculating the dispersion of harmful emissions generated as part of combustion reactions to calculate the maximum ground level concentration at exhaust gas-air mixture from a single source. It is possible to calculate the distance from the emission source where the surface concentration of pollutants reaches the maximum value.

*Keywords:* combustion, physical and chemical characteristics of combustion reactions.

#### Введение

Воздействие хозяйственной деятельности человека на природу со временем становится все более разрушительным. В связи с этим наиболее остро встает вопрос об обеспечении производственной и экологической безопасности промышленных производств и отдельных технологических процессов [1,2]. Технологические процессы, связанные с использованием реакций горения, являются серьезными загрязнителями окружающей природной среды, в основном атмосферного воздуха [3,4]. Также они являются опасными с точки зрения

промышленной безопасности. Разработка системы обеспечения промышленной и экологической безопасности таких процессов является актуальной.

Цель работы – рассмотреть особенности технологических процессов, связанных с использованием процессов горения.

Горение является одним из видов химических реакций, поэтому исследования его проводятся в рамках химической науки. Однако при горении происходят физические процессы, такие как тепло- и массоперенос. Поэтому естественно, что горение должно

рассматриваться в химическом и физическом аспектах. При проведении технологических процессов, связанных с процессами горения, необходимо учитывать многочисленные физико-химические особенности реакций горения.

#### **Физико-химические основы технологических процессов, связанных с использованием реакций горения**

Процессы горения широко используются человеком и лежат в основе работы транспорта, объектов теплоэнергетики, различных устройств, функционирование которых основано на использовании энергии реакций горения. При работе двигателей внутреннего сгорания и при сгорании топлив происходят многообразные физико-химические процессы:

1. Гомогенные процессы происходят с веществами, находящимися в одной фазе (газовой или жидкой), например, если в качестве топлива используются пары жидкого топлива или продукты возгонки твердого топлива, а в качестве окислителя – кислород воздуха.

2. Гетерогенное горение происходит на поверхности твердого или жидкого топлива и состоит из двух стадий: диффузии окислителя к поверхности и химической реакции на этой поверхности.

3. Ламинарное горение образуется при распространении фронта пламени по неподвижной или ламинарно движущейся горючей смеси. Фронт пламени представляет собой узкую зону около 1мм, отделяющую свежую смесь от продуктов сгорания, в которой температура меняется практически линейно за счет конвективного теплообмена путем прогрева свежей смеси от начальной температуры до температуры продуктов сгорания. Под воздействием излучения пламени перед фронтом на расстоянии до 5 мм протекают фотохимические процессы с образованием  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и т. д.

4. При турбулентном движении горючей смеси крупные пульсации искривляют и разрывают фронт пламени. Толщина фронта при атмосферном давлении значительно больше, чем у ламинарного (20-25 мм). Скорость турбулентного горения зависит от интенсивности и масштабов турбулентности.

5. Основная отличительная особенность процессов горения - наличие огромного экзотермического эффекта и достаточно высокой температуры, определяющей скорости этих реакций. Химическая реакция становится возможной, если молекулы реагирующих веществ обладают энергией, несколько большей, чем некоторая средняя энергия частиц. Если начальный запас энергии вещества больше, чем конечный, то в результате реакции выделяется теплота – это экзотермическая реакция. Горение - химическая реакция с экзотермическим эффектом и высоким значением энергии активации.

6. Скорость основных химических реакций в процессе горения зависит от концентраций топлива, окислителя, а также от константы скорости определенной химической реакции. При протекании любой обратимой реакции наступает момент, когда скорости прямой и обратной реакций становятся одинаковыми – это состояние химического равновесия. Обычно энергии активации прямой и обратной реакций различны, и с изменением температуры скорости прямой и обратной реакций изменяются в различной степени. При низких температурах равновесие может быть не достигнуто, сгорание будет неполным, образуются продукты неполного сгорания. При работе горелочных устройств трудно достичь полного сгорания топлива, и кроме  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$  в отработанных газах присутствуют продукты неполного сгорания: твердые частицы углерода и другие токсичные вещества (около 280).

7. Горение – сложный окислительно-восстановительный процесс. Окислителем, как

правило, является молекулярный кислород воздуха. Для интенсификации процессов горения в некоторых технологических процессах используют воздух с большим содержанием кислорода, чем 21 %, или чистый кислород. Окислителями могут быть хлор, фтор, бром, йод, окислы азота, галогены, нитросоединения, перхлораты и другие вещества. Однако такие варианты реакций встречаются значительно реже и для практики наибольшее значение имеют те реакции горения, где окислителем является кислород.

8. Для того, чтобы началась реакция горения должны соблюдаться некоторые условия. Горение возможно при наличии горючего вещества, окислителя (чаще кислорода) и источника зажигания. При этом необходимо, чтобы горючее вещество и кислород находились в определенных количественных соотношениях, а источник зажигания имел необходимый запас тепловой энергии. Известно, что в воздухе содержится около 21% кислорода. Горение большинства веществ становится невозможным, когда содержание кислорода в воздухе понижается до 14-18%, и только некоторые горючие вещества (водород, этилен, ацетилен) могут гореть при содержании кислорода в воздухе до 10% и менее. При дальнейшем уменьшении содержания кислорода горение большинства веществ прекращается. По соотношению горючего и окислителя различают процессы горения бедных и богатых горючих смесей. Бедные смеси содержат в избытке окислитель и имеют недостаток горючего компонента. Богатые смеси, наоборот, имеют в избытке горючий компонент и в недостатке окислитель. Горючие смеси могут иметь стехиометрический состав, т.е. соотношение горючего вещества и окислителя, вычисленное по уравнению химической реакции.

9. Горение может начаться самопроизвольно в результате самовоспламенения либо быть инициированным зажиганием. Источник зажигания вызывает реакцию горения в си-

стеме «горючее вещество – окислитель». Источники зажигания: горящее или накалившееся тело, электрический разряд. Для возгорания необходимо, чтобы источник зажигания обладал запасом энергии, достаточным для превращения горючих веществ в пары и газы и для нагрева их до температуры самовоспламенения. Возникновение горения связано с обязательным самоускорением реакции в системе с переходом ее в горение – самовоспламенением. По тепловой теории процесс самовоспламенения объясняется активизацией процесса окисления с возрастанием скорости химической реакции. По цепной теории процесс самовоспламенения объясняется разветвлением цепей химической реакции и подразделяется на три основных вида: тепловой, цепной и комбинированный – цепочно-тепловой.

#### Материальный баланс процессов горения

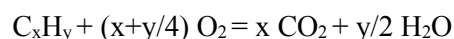
Материальный баланс формируется по элементному составу топлива, выражающему относительное массовое содержание отдельных элементов при полном и неполном сгорании топлива. Рабочая масса топлива складывается из массовых долей составляющих его элементов. Массовые доли  $\omega$  отдельных элементов топлива  $C_xH_yO_z$  находят по известным соотношениям:

$$\omega_C = 12x/M_T, \omega_H = y/M, \omega_O = 16z/M_T,$$

где  $M_T$  – молярная масса молекулы топлива  $C_xH_yO_z$  [5].

В большинстве сортов бензина и дизельных топлив наличием кислорода можно пренебречь, тогда молекула топлива  $C_xH_y$ , а ее молярная масса  $M_T = 12x+y$ .

Соотношение между количеством исходных продуктов (топлива и окислителя) и продуктов сгорания определяется из уравнений химических реакций. Полное окисление (сгорание) молекулы  $C_xH_y$  до конечных продуктов (диоксида углерода  $CO_2$  и водяного пара  $H_2O$ ) описывается известным уравнением [5]:



Состав продуктов сгорания в пересчете на 1 кг топлива будет следующим:

$$N_{CO_2} = x/M_T = x/(12x+y),$$

$$N_{H_2O} = (y/2) / M_T = (y/2)/(12x+y).$$

Для окисления требуется  $x+y/4$  кмоль  $O_2$ .

Если в состав топлива входит кислород  $C_xH_yO_z$ , то правая часть уравнения останется неизменной, а необходимое для сгорания количество кислорода воздуха (кмоль) уменьшится соответственно на  $z/2$  и будет составлять  $N_{O_2} = x+y/4 - z/2$ . Количество кислорода (кмоль), необходимое для полного сгорания топлива и определяемое из уравнения, называют стехиометрическим.

Масса кислорода, потребляемая из атмосферы для полного сгорания топлива (кг/кг топлива):  $m_{O_2} = 0,23\alpha l_o$ , где  $l_o$  – стехиометрическое число,  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха. Учитывая, что объемная доля кислорода в воздухе 21% и массовая 23,2%, можно рассчитать стехиометрическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива (кмоль или кг воздуха на 1 кг топлива).

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  – отношение количества воздуха, содержащегося в топливовоздушной смеси к его минимальному количеству, которое теоретически необходимо для полного сгорания. Если  $\alpha = 1$  – смесь стехиометрического состава;  $\alpha > 1,0$  – смесь бедная;  $\alpha < 1,0$  – смесь богатая. Для дизелей  $\alpha = 1,4-2,2$ , карбюраторных ДВС  $\alpha = 0,8-1,2$ .

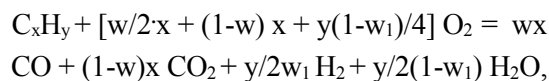
Согласно расчетам при полном сгорании 1 кг бензина АИ-76 потребляется 3,34 кг кислорода и выделяется 1,29, 11,39 и 3,16 кг паров воды, азота и диоксида углерода соответственно. При полном сгорании 1 кг бензина АИ-92 потребляется 3,04 кг кислорода и выделяется 1,46, 11,74 и 3,1 кг паров воды, азота и диоксида углерода соответственно.

Теплота сгорания топлива  $H_u$  (МДж/кг топлива), т. е. тепловой эффект реакций, идущих с образованием  $CO_2$  и  $H_2O$ , определяется по формуле:

$$H_u = 34,013 w_C + 125,6 w_H - 10,9(w_O - w_S) - 2,512 (w_W + w_H)$$

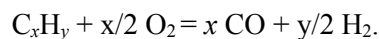
В реальных условиях происходит неполное окисление топлива. Количество кислорода будет меньше стехиометрического, часть углерода окислится до  $CO$ , а часть водорода не сгорит. Таким образом, характер и количество выбросов загрязняющих веществ зависит от вида топлива и физико-химических механизмов процесса горения.

Окисление углеводородной молекулы  $C_xH_y$  идет по уравнению



где  $w$  – массовая доля углерода, окислившегося до  $CO$ ;  $w_1$  – массовая доля несгоревшего водорода.

С уменьшением количества кислорода в продуктах сгорания будет увеличиваться содержание  $CO$  и  $H_2$  и уменьшаться содержание  $H_2O$  и  $CO_2$ . При  $w_1 = w = 1$  в продуктах сгорания будут содержаться только  $CO$  и несгоревший водород  $H_2$ . Соответствующее уравнение окисления имеет вид



Количество кислорода (кмоль)  $N_{O_2} = x/2$  соответствует условию, когда число атомов углерода равно числу атомов кислорода, т. е.  $C/O = 1$ . При дальнейшем уменьшении содержания кислорода ( $C/O > 1$ ) в продуктах сгорания появляется несгоревший углерод (сажа).

### Определение и расчет рассеивания выбросов вредных веществ

Для определения и расчета рассеивания выбросов вредных веществ необходимо использовать следующие исходные данные: число и высота источников выброса, диаметр устья трубы, скорость выхода и температура газовой смеси, температура окружающего воздуха, массы различных веществ (диоксида углерода, диоксида азота, угарного газа, углеводородов, диоксида серы и др.), выбрасываемые

мые в атмосферу в единицу времени. Для расчетов максимальных приземных концентраций при выбросе газовой смеси из одиночного источника используются:  $A$  – коэффициент, зависящий от температуры стратификации атмосферы;  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере;  $n$  и  $m$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий рельеф местности;  $H$  – высота источника, м;  $V_1$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  – разность температур выбрасываемой смеси и температуры окружающего воздуха. Расчет проводится отдельно для теплого и холодного периодов года. Также возможен расчет расстояния  $X_M$  (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях (интенсивный турбулентный режим в атмосфере, опасная скорость ветра) достигает максимального значения.

Радиус распространения токсичных веществ существенно отличается в различные периоды года. В теплый период года выбрасываемые вещества хуже рассеиваются и, как следствие, распространяются на меньшие расстояния, чем в холодный. Также максимальные приземные концентрации в летний период времени, превышают концентрации вредных веществ в зимний период.

### Заключение

Таким образом, рассмотрены физические и химические процессы, сопровождающие реакции горения, некоторые отличительные особенности процессов горения, такие как наличие значительного экзотермического эффекта, сложность окислительно-восстановительных процессов. Дана характеристика условий, необходимых для начала реакции горения, соот-

ношения горючего и окислителя. Рассчитан материальный баланс при полном и неполном сгорании топлива. Охарактеризованы данные, необходимые для определения и расчета рассеивания выбросов вредных веществ, образующихся в реакциях горения, для расчета максимальных приземных концентраций при выбросе газовой смеси из одиночного источника.

### Литература

1. Ермолаева В.А. Влияние технологического процесса контактной сварки на состав атмосферного воздуха // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, №4, 2013. – С.12-17.
2. Ермолаева В.А. Экологические аспекты технологического процесса предварительной обработки металла // *Вестник Тамбовского государственного университета*, т.19, вып. 5, 2014. – С.1413-1416.
3. Ермолаева В.А. Система очистки воздуха от сварочного аэрозоля // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, №2, 2014. – С. 5-9.
4. Ермолаева В.А. Основные преимущества двухступенчатого метода сжигания топлива // *Технологии техносферной безопасности*, №5, 2014.
5. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. – М.: Высшая школа, 2003.

### References

1. Ermolaeva V.A. Vlijanie tehnologicheskogo processa kontaktnoj svarki na sostav atmosfernogo vozduha [The effect of contact pressure welding process on the atmospheric air composition] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2013, № 4. – P.12-17.
2. Ermolaeva V.A. Jekologicheskie aspekty tehnologicheskogo processa predvaritel'noj obrabotki metalla [Environmental aspects of the process of metal pre-treatment] // *Vestnik TGU* [Bulletin TSU]. Vol. 19, Issue 5, 2014. – P.1413-1416.
3. Ermolaeva V.A. Sistema ochistki vozduha ot svarochnogo ajerozolija [The system of cleaning the air from welding fumes] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2014, № 2. – P.5-9.

4. *Ermolaeva V.A.* Osnovnye preimushhestva dvuhstupenchatogo metoda szhiganiya topliva [The main advantages of the two-stage combustion method] // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti [Technospheric security technology], №5, 2014.

5. *Lukanin V.N., Trofimenko J.V.* Promyshlennotransportnaja jekologija [Industrial and Transport Ecology] – Moscow, Vysshaja shkola, 2003.

**Статья поступила в редакцию 1 декабря 2014 г.**

---

*Ермолаева Вера Анатольевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: ermolaevava2013@mail.ru

---

*Ermolaeva Vera Anatoljevna* – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: ermolaevava2013@mail.ru