

# МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ЗАПАХОВ ИЗ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ\*

В. ЗЕМЕЛЬКИН, генеральный директор, А. ЗЕМЕЛЬКИН, ООО «НПП «ДУБРАВА»

## МЕТОД СЖИГАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДУХА С ДУРНО ПАХНУЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ (ДПВ)

В практике очистки технологического воздуха от загрязняющих веществ, в том числе от ДПВ, известен метод совместного их сжигания, в смеси. При этом необходимо учитывать, что воздух может состоять, как в нашем случае, из веществ газообразных (аммиак, триметиламин, метилмер-каптан), жидких в аэрозольной форме (гексан, метилбутаналь, гексаналь) и твердых в аэрозольной форме (агидол-1, комбикормовая пыль). И они, так же как и топливо, потребуют достаточного количества кислорода для полного сгорания. Поэтому важно правильно определить минимальное количество воздуха обеспечивающее полное сгорание единицы массы или объема горючего вещества, которое называется теоретически необходимым и имеет обозначение  $V_B^0$ .

- *Горючее вещество* — индивидуальное химическое соединение

Для таких горючих веществ независимо от их агрегатного состояния теоретически необходимое количество воздуха определяется из уравнений реакции горения. На  $m$  кмоль горючего вещества приходится  $n$  кмоль кислорода и азота из уравнения реакции горения. Обозначив массу (кг) горючего вещества, численно равную молекулярной массе его, через  $M$ , составляют пропорцию:

$$\begin{aligned} mM \text{ кг} &— n 22,4 \text{ м}^3 \\ 1 \text{ кг} &— V_B^0 \text{ м}^3, \end{aligned}$$

где  $22,4 \text{ м}^3$  — объем 1 кмоль газов (при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $101\,325 \text{ Па}$ ).

Исходя из данной пропорции теоретически необходимый объем воздуха для сгорания 1 кг вещества будет равен (из пропорции):

$$V_B^0 = \frac{22,4n}{mM} \quad (1)$$

Если объем воздуха, полученный по формуле (1), необходимо привести к иным условиям, то пользуются следующей формулой:

$$V_B = \frac{101\,325 V_B^0 T}{273p} \quad (2)$$

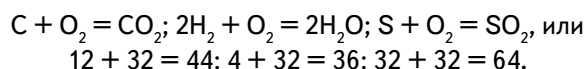
где  $T$  — заданная температура газов,  $K$ ;  
 $p$  — заданное давление,  $\text{Па}$ .

Теоретически необходимый объем воздуха для сгорания  $1 \text{ м}^3$  горючих газов определяется по формуле:

$$V_B^0 = \frac{n}{m} \quad (3)$$

- *Горючее вещество* — сложная смесь химических соединений

Таковыми веществами являются древесина, торф, каменный уголь и органические вещества. Для определения теоретически необходимого объема воздуха нужно знать элементный состав горючего вещества, выраженный в массовых процентах, то есть содержание  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$ ,  $N$ ,  $W$  (зола),  $W$  (влаги). (Элементный состав вещества определяют в аналитической лаборатории.) В этом случае для расчета  $V_B^0$  используют уравнение реакции горения углерода, водорода, серы и массовое соотношение реагирующих веществ:



Если для сгорания 12 кг углерода требуется 32 кг кислорода, то для 0,01 кг углерода, то есть 1% (по массе), его потребуется в количестве:  $0,01 \cdot 32/12 = 0,01 \cdot 8/3$  кг; для водорода:  $0,01 \cdot 32/4 = 0,01 \cdot 8$  кг; для серы  $0,01 \cdot 32/32 = 0,01 \cdot 1$  кг, соответственно.

Таким образом, для полного сгорания 1 кг горючего вещества необходимо кислорода (кг):

$$\frac{8 \cdot 0,01}{3} [C] + 8 \cdot 0,01 [H] + 0,01 [S] - 0,01 [O],$$

где  $[C]$ ,  $[H]$ ,  $[S]$ ,  $[O]$  — содержание углерода, водорода, серы и кислорода в горючем веществе, % (по массе).

На вычисленное количество кислорода в воздухе приходится в  $77/23$  раза больше азота. Сумма массы азота и кислорода составляет массу воздуха  $L_B^0$  (кг), необходимую для горения 1 кг вещества:

$$\begin{aligned} L_B^0 &= \left(1 + \frac{77}{23}\right) \left(\frac{8 \cdot 0,01}{3} [C] + 8 \cdot 0,01 [H] + 0,01 [S] - 0,01 [O]\right), \\ \text{или } L_B^0 &= 0,3478 \left(\frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8}\right) \quad (4) \end{aligned}$$

Количество воздуха в объемных единицах при нормальных условиях:

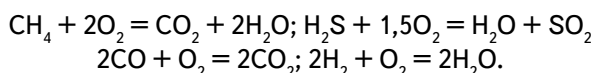
$$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{[C]}{3} + [H] + \frac{[S]}{8} - \frac{[O]}{8}\right) \quad (5)$$

\*Продолжение. Начало в №6-2015

• *Горючее вещество — смесь газов*

К этой группе веществ относятся горючие газы, например природный, доменный, коксовый, а также органические вещества, находящиеся в выбросах в газообразном виде. Все они в разных количествах содержат CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и др. Состав горючих газов обычно выражают в объемных процентах.

Для расчета используют уравнение реакции горения наиболее распространенных газов — метана (CH<sub>4</sub>) и оксида углерода (CO):



Если для сгорания 1 м<sup>3</sup> метана требуется 2 м<sup>3</sup> кислорода, как это видно из уравнения, то для сгорания 0,01 м<sup>3</sup> метана, то есть 1% (по объему), потребуется 0,01 · 2 м<sup>3</sup> кислорода. Для сгорания 1 м<sup>3</sup> оксида углерода — 0,01/2 м<sup>3</sup> кислорода, такое же его количество потребуется для сгорания 1 м<sup>3</sup> водорода, а для сероводорода необходимо 0,01 · 1,5 м<sup>3</sup> кислорода. Рассчитать количество кислорода для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> горючего газа можно по формуле:

$$0,01 \cdot 2 [\text{CH}_4] + \frac{0,01}{2} [\text{H}_2] + \frac{0,01}{2} [\text{CO}] + 0,01 \cdot 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - 0,01 [\text{O}_2] \quad (6),$$

где [CH<sub>4</sub>], [H<sub>2</sub>], [CO], [H<sub>2</sub>S] и [O<sub>2</sub>] — содержание метана, водорода, оксида углерода, сероводорода и кислорода, % (по объему).

В воздухе на этот объем кислорода приходится в 79/21 раза больше азота.

Сумма объемов азота и кислорода составляет объем (м<sup>3</sup>) воздуха, необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> газа:

$$V_{\text{в}}^{\circ} = \left(1 + \frac{79}{21}\right) \left(0,01 \cdot 2 [\text{CH}_4] + \frac{0,01}{2} [\text{H}_2] + \frac{0,01}{2} [\text{CO}] + 0,01 \cdot 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - 0,01 [\text{O}_2]\right), \text{ или}$$

$$V_{\text{в}}^{\circ} = \frac{2 [\text{CH}_4] + 0,5 [\text{H}_2] + 0,5 [\text{CO}] + 1,5 [\text{H}_2\text{S}] - [\text{O}_2]}{21} \quad (7).$$

Как видим, числа в числителе уравнения (7) — это коэффициенты при кислороде в уравнениях реакций горения. Поэтому если в составе газа будут другие горючие компоненты, то они могут быть поставлены в это уравнение с коэффициентами, взятыми из их уравнений горения.

В реальном процессе горения расходуется воздуха значительно больше теоретически необходимого (V<sub>в</sub><sup>о</sup>). Разность между количеством воздуха, практически расходуемым на горение и теоретически необходимым, называется избытком воздуха, который учитывается коэффициентом избытка воздуха (α) и выражает отношение количества воздуха, практически расходуемого на горение (V<sub>в.пр.</sub>), к теоретически необходимому:

$$\alpha = \frac{V_{\text{в.пр.}}}{V_{\text{в}}^{\circ}} \quad (8).$$

Учитывая, что концентрация кислорода в воздухе составляет 21% (объемные), а процентное содержание свободного кислорода в продуктах сгорания определится из анализа, коэффициент избытка воздуха может быть выражен в другом виде:

$$\alpha = \frac{21}{21 - [\text{O}_2]} \quad (9).$$

Кроме расчетов по определению количества воздуха, необходимого для сжигания топлива и загрязняющих веществ в технологическом воздухе, необходимо также учесть технологические показатели работы топок, которые применяются на данном предприятии.

• *Теплотехнические показатели работы топок*

Важная теплотехническая характеристика топочных устройств, основываясь на которой решаются вопросы их конструкции и оценивается интенсивность работы, — тепловое напряжение объема топочного пространства. Оно выражается отношением Q/V<sub>т</sub> и представляет собой количество теплоты (Вт/м<sup>3</sup>), выделившейся при сжигании определенного количества топлива в единицу времени (В) и приходящейся на 1 м<sup>3</sup> объема топочного пространства:

$$q_{\text{н}} = Q/V_{\text{т}} = Q_{\text{рн}} \cdot B/V_{\text{т}} \quad (10).$$

Если значение q<sub>н</sub> будет превышать определенную числовую величину, установленную практически, то за время нахождения в топке топливо не сгорит полностью. Опыт эксплуатации котельных агрегатов показал, что для различных видов топлива, способов сжигания и конструкций топок допустимое значение q<sub>н</sub> изменяется в широких пределах. Например, для камерных топок при сжигании угольной пыли оно составляет 145–230 кВт/м<sup>3</sup>, а при сжигании в них газа или мазута — 230–460 кВт/м<sup>3</sup>.

Чем больше величина q<sub>н</sub> для заданных размеров топки и одного и того же вида топлива, тем интенсивнее протекает топочный процесс, больше сжигается топлива в единицу времени и больше вырабатывается теплоты. Однако форсировать топку можно лишь до определенного предела, в противном случае возрастают потери от химической и механической неполноты сгорания, снижается КПД.

Горение топлива — химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающаяся интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя используется кислород воздуха. Процессы горения разделяют на две группы: *гомогенное горение* — горение газообразных горючих (характеризуется системой «газ + газ»); *гетерогенное горение* — горение твердых и жидких горючих (характеризуется системой «твердое тело + газ» или «жидкость + газ»).

Процесс горения может протекать с разной скоростью — от медленного до мгновенного. Медленное горение — самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение представляет собой взрыв. В теплотехнических установках практическое значение имеет такая скорость реакции, при которой происходит

устойчивое горение, то есть при постоянной подаче топлива и окислителя в зону горения. Соотношение концентрации топлива и окислителя при этом должно быть определенным. При его нарушении (богатая смесь, бедная смесь) скорость реакции снижается и уменьшается тепловыделение на единицу объема.

Горение — в основном это химический процесс, поскольку в результате его протекания происходят качественные изменения состава реагирующих масс. Но в то же время химическая реакция горения сопровождается различными физическими явлениями: перенос теплоты, диффузионный перенос реагирующих масс и другое.

Время горения топлива складывается из времени протекания физических ( $i_{\text{физ}}$ ) и химических ( $i_{\text{хим}}$ ) процессов:

$$i_{\text{гор}} = i_{\text{физ}} + i_{\text{хим}}$$

Время протекания физических процессов состоит из времени, необходимого для смешивания топлива с окислителем ( $i_{\text{см}}$ ), и времени, в течение которого топливо-воздушная смесь подогревается до температуры воспламенения ( $t_{\text{н}}$ ):

$$i_{\text{физ}} = i_{\text{см}} + t_{\text{н}}$$

Время горения ( $i_{\text{гор}}$ ) определяется скоростью наиболее медленного процесса.

#### Горение газообразного топлива

Минимальная температура, при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой воспламенения. Значение этой температуры для различных газов неодинаково и зависит от теплофизических свойств горючих газов, содержания горючего в смеси, условий зажигания, условий отвода теплоты в каждом конкретном устройстве и т.д.

Горючий газ в смеси с окислителем сгорает в факеле. Здесь различают два метода сжигания: кинетический и диффузионный. При *кинетическом* сжигании до начала горения газ предварительно смешивается с окислителем в специальном устройстве горелки. Горение смеси осуществляется вне пределов смесителя. При этом скорость горения ( $v$ ) не должна превышать скорости химических реакций горения  $v_{\text{гор}} = v_{\text{хим}}$ .

*Диффузионное* горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ поступает в рабочий объем отдельно от воздуха. Скорость процесса ограничивается скоростью смешивания газа с воздухом  $v_{\text{гор}} = v_{\text{физ}}$ . Кроме этого существует смешанное (диффузионно-кинетическое) горение. При этом газ предварительно смешивается с некоторым количеством воздуха, затем эта смесь поступает в рабочий объем, куда отдельно подается остальная часть воздуха.

В топках котельных агрегатов в основном используют кинетический и смешанный способы сжигания топлива.

Небольшой экскурс в теорию показывает, что процессы сжигания ДПВ вместе с технологическим воздухом тре-

буют тщательной проектной проработки этого вопроса. Рассмотрим возможные варианты сжигания технологического воздуха.

#### Вариант 1. Сжигание в пламени метановой горелки.

Загрязняющие вещества в нашем случае — это аммиак, амины (триметиламин и триэтиламин), метилмеркаптан, «нормальные» органические соединения (гексан, алифатические альдегиды: гексаналь, метилбутаналь, а также производное фенола — 2,6-бис-(1,1-диметилэтил)-4-метилфенол (агидол-1), комбикормовая пыль.

Процесс горения открытого метанового пламени — процесс многоступенчатый, состоящий из набора радикальных реакций. Однако для простоты будем считать, что это просто стехиометрическая реакция метана с кислородом воздуха ( $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), протекающая при температуре 1200°C (в самой горячей части пламени). При этом *аммиак* окисляется до азота по реакции:  $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . *Триметиламин* и *триэтиламин* окисляются до азота, углекислого газа и воды:  $(\text{CH}_3)_3\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ;  $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_3\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . *Метилмеркаптан* окисляется до сернистого ангидрида, углекислого газа и воды:  $\text{CH}_3\text{SH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ .

При этом процессе необходимо учитывать, что предельно допустимая концентрация (ПДК) для сернистого газа в атмосферном воздухе составляет: максимально-разовая — 0,5 мг/м<sup>3</sup>, среднесуточная — 0,05 мг/м<sup>3</sup>. Но поскольку концентрация метилмеркаптана в выбросах мала — не более 0,01 мг/м<sup>3</sup>, то очевидно, что после сгорания меркаптана в пламени горелки концентрация сернистого газа также не превысит 0,01 мг/м<sup>3</sup>, что будет меньше ПДК.

*Гексан* окисляется до углекислого газа и воды ( $\text{C}_6\text{H}_{14} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), как и *метилбутаналь*, *гексаналь* и *агидол-1* ( $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ).

Достоверно можно считать, что комбикормовая пыль состоит из белка и сгорает в пламени также с образованием окислов азота, углекислого газа, золы и воды.

Основная проблема неполного сгорания указанных примесей заключается в том, что весь объем воздуха, попадающего в зону горения, должен контактировать с активной зоной горения. В противном случае дожигание примесей не будет полным. Это решается с помощью конструкции горелки. Пламя горящего природного газа проходит сквозь сотовую конструкцию огнеупорного кирпича или через что-то подобное. При этом та часть примесей, которая не сгорает непосредственно в пламени, будет дожигаться при контакте с раскаленной поверхностью сотовой конструкции.

Основным негативным процессом в высокотемпературном горении является образование окислов азота (оксида и диоксида). Однако присутствие примеси меркаптана, вероятно, поможет заметно снизить количество окислов азота в выхлопе. Стоит напомнить, что окислы азота образуются при любом процессе горения, так как азот присутствует в атмосферном воздухе (78%).



### Вариант 2.

#### *Сжигание в каталитической метановой горелке.*

Весьма перспективным представляется очистка промышленных выбросов путем их совместного сжигания в присутствии природного газа с использованием катализаторов.

Процессы горения в слое катализатора протекают при температуре примерно в 2–2,5 раза меньшей, чем в открытом пламени (400–600°C вместо 1200°C). Это позволяет уменьшить уровень окислов азота в выхлопе, а степень конверсии уверенно достигает 100%. Тем не менее необходимо учитывать, что примесь серосодержащих соединений может в заметной степени деактивировать катализатор (особенно на основе благородных металлов). Этот негативный процесс подавляется с помощью либо тщательного подбора катализатора, либо предварительного обессеривания выбросов перед их каталитическим сжиганием.

Подбор катализатора потребует лабораторных испытаний, так как в настоящее время подобных работ найти не удалось.

### **Устройства для сжигания**

В качестве оборудования, в котором возможно сжигать технологический воздух с ДПВ, используют котельную предприятия, отдельную котельную установку с водогрейным котлом или газовый электрогенератор (см. рисунок). Последний характеризуется простотой в эксплуатации и обслуживании, высокой экологичностью, дешевизной потребляемого топлива и вырабатываемой электроэнергии. Эта силовая установка позволит решить одновременно две задачи: сжечь технологический воздух с ДПВ и обеспечить электроэнергией технологическое производство. Основное требование при выборе устройства для сжигания технологического воздуха с ДПВ — способность устройства принимать нужное количество дутьевого воздуха.

Сжигание технологического воздуха с ДПВ — это эффективный способ очистки выбросов, но одновременно с



*Газовый электрогенератор (Германия)  
мощностью 500 кВт*

этим сложный расчетный процесс, который требует создания в топке специальных условий и бесперебойной подачи технологического воздуха в определенном объеме. При его снижении произойдет неполное сгорание топлива и химических веществ, содержащихся в воздухе, что визуально выразится в выбросах большого количества восстановленного углерода (образование ультрадисперсной сажи). При увеличении — срыв пламени горелки и остановка всего нагревательного оборудования.

Все котлоагрегаты регулируются на оптимальный и эффективный расход топлива. Как говорилось выше, расход дутьевого воздуха связан с расходом топлива. Поэтому для увеличения количества «перерабатываемого» воздуха потребуются либо увеличивать расход топлива, либо наладить работу котла с большим коэффициентом избытка воздуха, что может негативно сказаться на режиме горения топлива и экономической эффективности процесса.

Таким образом, метод сжигания технологического воздуха с ДПВ имеет ограничение по расходу воздуха, подаваемого в котлоагрегат для сжигания. ■

*Продолжение в следующих номерах*



### **ИНФОРМАЦИЯ**

**Брянское оборудование** для обработки зерна получило высокую оценку со стороны заместителя полномочного представителя Президента РФ в ЦФО Ольги Атюковой. Речь идет о зерносушильно-очистительном комплексе на базе сушилки СП-100. Это оборудование с 2000 г. выпускает в Брянске ООО «ОКБ по теплогенераторам», постоянно модернизируя модели и расширяя ассортимент. Оно успешно эксплуатируется в разных регионах

России, а с недавнего времени активно приобретается и местными предприятиями АПК. По словам аграриев, уже испытывавших их в деле, отечественные комплексы не только не уступают лучшим импортным аналогам по производительности и эффективности, но даже заметно превосходят их. При этом стоимость оборудования втрое ниже аналогичных зарубежных сушилок.

Как отметил глава региона Александр Богомаз, подобные машины про-

сто необходимы для послеуборочной обработки сельхозкультур. В первую очередь — зерна кукурузы, производство которого в области стремительно растет, а также сои и рапса. Поэтому региональная власть намерена в следующем году разработать и начать реализовывать целевую программу по субсидированию сельхозпроизводителям части затрат на покупку сушилок брянского производства.

*bryanskobl.ru*