

**ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТ**

А. И. ПАПУША, У. Г. ПИРУМОВ, М. Б. ПРОХОРОВ

(Москва)

Рассмотрены теоретические аспекты процессов образования и нейтрализации токсичных компонент в высокотемпературных движущихся средах с учетом химической кинетики. Рассмотрена проблема распространения токсичных компонент в атмосфере при струйных течениях вблизи выхлопных устройств. Приведены некоторые результаты расчетных исследований в различных отраслях техники и рекомендованные на их основе новые методы нейтрализации токсичных компонент.

Основным источником токсичных компонент и ряда канцерогенных элементов, а также аэрозолей являются высокотемпературные процессы в движущихся средах, имеющие место в энергетической промышленности, металлургии, автотранспорте, ракетной и авиационной технике. Для количественного и качественного прогнозирования этих процессов, создания способов борьбы с токсичными компонентами и аэрозолями необходимо иметь физическую модель, адекватную математическую модель и, наконец, эффективные методы решения соответствующих уравнений.

В физической модели необходимо учитывать сжимаемость газа, неравновесное протекание химических реакций, наличие частиц и их температурные и скоростные поля, а также в общем случае нестационарный и пространственный характер процессов. Математическая модель этих процессов включает уравнения газовой динамики, уравнения химической кинетики и уравнения движения и энергии частиц.

Рассмотрим нестационарное пространственное течение смеси газа и частиц одного размера без учета вязкости, теплопроводности и диффузии при наличии неравновесных химических реакций, описываемое следующей системой уравнений [1]:

$$(1) \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla W = 0$$

$$(2) \quad \rho \frac{dW}{dt} + \nabla p + \rho_s f = 0$$

$$(3) \quad \rho \frac{d}{dt} \left(h + \frac{W^2}{2} \right) + \rho_s (W_s f + q) = \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$(4) \quad \frac{d\rho_s}{dt} + \rho_s \nabla W_s = 0$$

$$(5) \quad \frac{dW_s}{dt} = f, \quad \frac{de_s}{dt} = q$$

$$(6) \quad \frac{d\gamma_i}{dt} = F_i(p, T, \gamma_i), \quad i=1, \dots, N$$

$$(7) \quad h = \sum_{i=1}^N h_i(T) \gamma_i, \quad p = \frac{R\rho T}{\mu_s}, \quad e_s = e_s(T_s)$$

Здесь d/dt — субстациональная производная, нижним индексом s обозначены параметры частиц, p, ρ, T, W — давление, плотность, температура и вектор скорости, γ_i — молярно-массовая концентрация i -й компоненты, h — энтальпия газовой смеси, R — универсальная газовая постоянная, μ_x — молекулярный вес смеси, e — внутренняя энергия, f — сила воздействия частиц на газ, q — тепловой поток от частиц к газу.

В системе (1)–(7) уравнения (1) и (4) — уравнения неразрывности газовой смеси и частиц соответственно, уравнения (2), (3), (5) — уравнения энергии газа и частиц, уравнение (6) — уравнение неразрывности для

| Реакция | A | B | C | Реакция | A | B | C |
|---|---------------------|------|------|---|---------------------|---|---------|
| $\text{CO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{M}$ | $3.5 \cdot 10^{14}$ | 0 | 2100 | $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ | $1.1 \cdot 10^{14}$ | 0 | 8600 |
| $\text{H} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$ | $1.4 \cdot 10^{20}$ | 1.5 | 0 | $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$ | $1.0 \cdot 10^{13}$ | 0 | 1200 |
| $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$ | $5.5 \cdot 10^{17}$ | 0.87 | 0 | $\text{O}_2 + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ | $1.3 \cdot 10^{13}$ | 0 | 9860 |
| $\text{OH} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ | $1.2 \cdot 10^{20}$ | 1.0 | 0 | $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}$ | $2.2 \cdot 10^{14}$ | 0 | 16 550 |
| $\text{O} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{OH} + \text{M}$ | $3.3 \cdot 10^{18}$ | 0.5 | 0 | $\text{NO} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}$ | $5.2 \cdot 10^{13}$ | 0 | 107 000 |
| $\text{N} + \text{N} + \text{M} \rightarrow \text{N}_2 + \text{M}$ | $2.7 \cdot 10^{16}$ | 0.5 | 0 | $\text{NO} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}$ | $5.0 \cdot 10^{13}$ | 0 | 200 |
| $\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ | $3.3 \cdot 10^{15}$ | 0 | 0 | $\text{N} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{NO} + \text{M}$ | $1.1 \cdot 10^{13}$ | 0 | 41 700 |
| $\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ | $2.5 \cdot 10^{12}$ | 0 | 5100 | | | | |

i -й компоненты (число таких уравнений равно числу компонент), а уравнения (7) — термические и калорические уравнения состояния газа и частиц.

В высокотемпературных процессах обычно участвуют газовые компоненты, содержащие атомы С, О, Н и N. Для системы С—О—Н—N—была выбрана система цепных химических реакций и соответствующих констант скоростей реакций, приведенная в таблице. В таблице $R = 1,987 \text{ кал/моль} \cdot \text{град}$, размерность бимолекулярных реакций $\text{см}^3/\text{моль} \cdot \text{сек}$, а тримолекулярных — $\text{см}^6/\text{моль}^2 \cdot \text{сек}$. Константы скоростей реакций представлены в виде $k_j = AT^{-B} \exp(-C/RT)$. Система уравнений (1)–(7) является в общем случае сложной нелинейной системой уравнений в частных производных. Число уравнений в этой системе для реальных смесей составляет 15–20. Очевидно, что решение этой системы в аналитическом виде невозможно и поэтому необходимо создание специальных численных методов решения. Авторами для решения уравнений типа уравнений химической кинетики, а также движения и теплообмена частиц (так называемых релаксационных уравнений) развит метод, основанный на использовании неявных разностных схем. Этот численный метод применяется при расчетах течений в соплах и струях, в которых имеют место разного рода неравновесные процессы, такие, как неравновесное протекание химических реакций, неравновесное возбуждение колебательных степеней свободы, неравновесное движение частиц и т. д. [1].

При решении проблемы образования и распространения вредных примесей вблизи выхлопных устройств в атмосфере исследовались струйные течения с учетом химических превращений с использованием «укороченных» уравнений Навье — Стокса. Последние были получены из уравнений Навье — Стокса в предположении равенства нулю вторых продольных и смешанных производных или в пренебрежении возвратным влиянием течения в дальних сечениях на течение вверх по потоку. Рассматриваются ламинарные и турбулентные течения с учетом вязкости, теплопроводности и диффузии. Уравнения в этом случае являются параболическими и позволяют поставить задачу Коши. Исходная система уравнений без

учета частиц имеет вид

$$(8) \quad \frac{\partial}{\partial x}(\rho u r^v) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r^v) = 0$$

$$(9) \quad \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r^v \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

$$(10) \quad \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \\ + v \left[2\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{v}{r} \right) \right]$$

$$(11) \quad u \frac{\partial J}{\partial x} + v \frac{\partial J}{\partial r} = \frac{1}{\rho r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^v \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial J}{\partial r} + \mu r^v \left(1 - \frac{1}{Pr} \right) u \frac{\partial u}{\partial r} - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) r^v \frac{\mu}{Pr} \sum_{i=1}^N h_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial r} \right]$$

$$(12) \quad u \frac{\partial \gamma_i}{\partial x} + v \frac{\partial \gamma_i}{\partial r} = \frac{1}{\rho r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \gamma_i}{\partial r} \right) + F_i$$

$$(13) \quad p = \rho \frac{R}{\mu_s} T$$

Здесь x, r — координаты вдоль и поперек струи соответственно: $v=0$ в плоском случае, $v=1$ — в осесимметричном; u и v — компоненты скорости вдоль x и r , J — полная энтальпия, μ — коэффициент вязкости (ламинарный или эффективный турбулентный), Pr, Le — числа Прандтля и Льюиса.

Для численного решения эта система уравнений аппроксимируется неявной разностной схемой второго порядка точности. Полученная алгебраическая система уравнений решается на ЭВМ методом прогонки с использованием граничных условий в начальном сечении, на оси и во внешнем потоке.

С использованием описанных выше математических моделей и численных методов были проведены исследования образования токсичных компонент в различных отраслях техники. Ниже представлены некоторые результаты таких исследований.

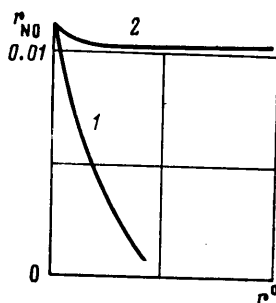
Рассмотрим первоначально неравновесные течения газа в соплах реактивных двигателей [1]. Отметим, что некоторые особенности образования токсичных компонент в соплах носят достаточно общий характер и имеют место в других устройствах.

На фиг. 1 представлена зависимость молярной концентрации r_{NO} от $r^0 = r/r_*$, где r — текущий радиус сопла, а r_* — радиус минимального сечения. На этой фигуре равновесные значения обозначены индексом 1, а неравновесные — 2.

Из результатов расчетов следует, что отклонение состава и термодинамических параметров продуктов сгорания от равновесных значений начинается в трансзвуковой области сопла, где градиенты газодинамических параметров максимальны. Расчеты показывают также, что молярные доли веществ CO_2, CO, N_2, O_2, H_2O и NO в окрестности критического сечения замораживаются и их изменение вниз по потоку не превышает 5–10%. Молярные доли таких компонент, как O, H, OH и H_2 , хотя и значительно отличаются от равновесных значений, однако вниз по потоку не замораживаются.

В случае течения бинарной смеси, когда протекает лишь одна реакция рекомбинации, а обменные реакции отсутствуют, происходит резкое замораживание этой реакции в трансзвуковой области и далее вниз по потоку течение практически заморожено.

Для систем С—О—Н при температурах T_0 2300° К течение в сопле является замороженным. Действительно, при таких температурах состав продуктов сгорания в равновесных условиях может быть в ряде случаев определен с помощью реакции водяного пара $H_2O + CO = CO_2 + H_2$. Однако в таком виде реакция в действительности не реализуется, а осуществляется через записанную в таблице [1] цепочку реакций.

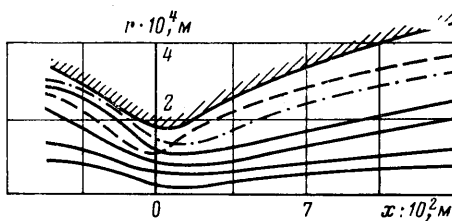


Фиг. 1

В каждой реакции этой цепочки должны участвовать либо радикал ОН, либо атомарные компоненты О и Н, которые при температурах, меньших 2300° К, практически отсутствуют. Это приводит к тому, что эти реакции не протекают и заморожены, начиная от камеры сгорания.

На степень отклонения параметров потока в сопле от равновесных значений существенно влияет состав газовой смеси. Наибольшее отклонение от равновесия имеет место при стехиометрических газовых смесях, имеющих повышенный уровень диссоциации продуктов сгорания на входе в сопло. По мере обогащения или обеднения смеси степень диссоциации падает и степень отклонения от равновесия уменьшается.

Особенно важным с точки зрения образования токсичных компонент является замораживание NO (фиг. 1). Экспериментальные измерения соответствующих концентраций NO при течении высокотемпературных газов в сопле полностью подтвердили результаты неравновесных расчетов. Следует отметить, что определение концентрации NO по результатам равновесных расчетов дает ошибку на 1—2 порядка в сторону занижения NO (фиг. 1). Замораживание концентраций NO экспериментально обнаружено и в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Таким образом, представленные примеры расчетов показывают важность учета неравновесного протекания химических реакций. Как видно, равновесный расчет может привести к необоснованному и опасному прогнозу содержания токсичных компонент.



Фиг. 2

В продуктах сгорания реактивных двигателей могут находиться твердые или жидкие частицы. Наличие твердых или жидких частиц приводит к значительному усложнению физической картины по сравнению с течением чистого газа и вследствие этого к усложнению математического описания явлений и методов решений [1]. Как правило, смесь газа и частиц

является полидисперсной, т. е. содержит частицы различных размеров, и тогда в уравнениях (2) и (3) вместо членов $\rho_s f$ и $\rho_s (W_s f + q)$ необходимо записать сумму по всем фракциям, а число уравнений (4), (5) становится равным числу фракций. На фиг. 2 представлены траектории частиц для некоторых характерных случаев. При больших размерах частиц ($d_s > 10$ мкм) и малых диаметрах минимального сечения сопла ($r_s < 12.5$ мм) траектории частиц в сверхзвуковой части сопла близки к прямолинейным. Траектории частиц малых размеров искривлены и при больших диаметрах сопла близки по форме к линиям тока газа. Такой характер поведения частиц различных размеров связан с тем, что запаздывание частиц по скорости и температуре увеличивается при увеличении размера частиц, градиента газодинамических параметров и при уменьшении плотности газа. Линии тока газа (показаны пунктиром на фиг. 2) и частиц (показаны сплошными линиями) в дозвуковой части довольно близки между собой, а в трансзвуковой и сверхзвуковой частях заметно различаются, особенно при больших диаметрах частиц и малых диаметрах минимального сечения сопла.

Для частиц всех размеров существует траектория, которая касается стенки сопла в дозвуковой части (показано штрихпунктиром на фиг. 2). Эти предельные траектории разделяют поток частиц в сопле. Частицы, траектории которых расположены выше предельной и пересекают контур сопла в дозвуковой части, выпадают на стенку сопла.

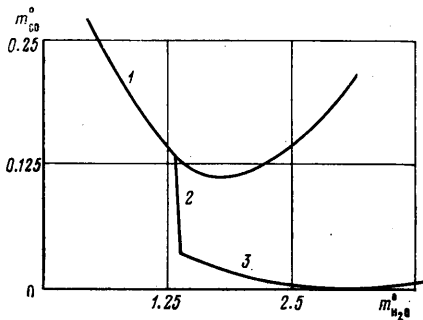
Большой практический интерес представляет рассмотрение задачи течения высокотемпературного реагирующего газа в трубе переменного сечения с подводом различных химических реагентов. Были проведены расчеты течения продуктов сгорания топлива кислород — керосин при коэффициентах избытка кислорода топлива $\alpha = 0.76$ и 1 без ввода и с вводом воздуха (0.225 кг на 1 кг топлива), а также указанной смеси продуктов сгорания при $\alpha = 1$ с воздухом и водой (2.25 кг на 1 кг топлива) при давлении — 0.4 МПа. Проведенные расчеты с учетом кинетики химических реакций позволяют сделать общие выводы о влиянии темпа охлаждения и коэффициента избытка окислителя на температуры замораживания T° окисей углерода и азота. Установлено, что мольные доли окисей углерода и азота с некоторой температурой превышают равновесные, а затем, через 100—600°, становятся постоянными и соответствуют мольным долям равновесного состава при условной температуре замораживания T° , находящейся примерно посередине указанного интервала температур.

При увеличении коэффициента избытка кислорода уменьшается мольная доля окиси углерода и увеличивается доля окиси азота; при замедлении темпа охлаждения уменьшаются мольные доли окисей углерода и азота.

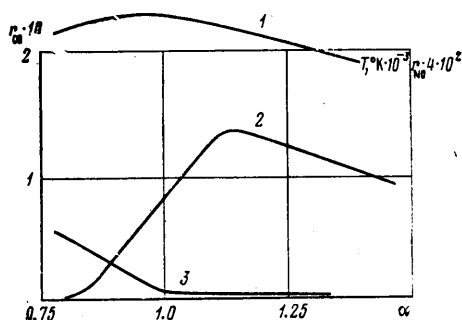
Следует отметить, что охлаждение высокотемпературной среды может осуществляться как путем расширения газа, например в реактивном сопле или цилиндре двигателя внутреннего сгорания, так и путем теплоотвода в стенку или впрыска охлаждаемого компонента. Однако в последнем случае на температуру замораживания кроме темпа охлаждения определенное влияние оказывает химическая активность впрыскиваемого компонента.

Учитывая рекомендации о приемлемых способах нейтрализации окисей углерода и азота и полученные результаты расчетного анализа, приходим к следующему выводу: нейтрализацию окисей углерода и азота в высокотемпературной среде (с $T \geq 2000^\circ \text{K}$) необходимо осуществлять в две стадии. Вначале осуществляется разложение окиси азота в восстановительной среде с коэффициентом избытка окислителя $\alpha < 1$ при температурах $T =$

$=2000-2600^{\circ}\text{K}$, а затем дожигание окиси углерода в окислительной среде с $\alpha > 1$ и $T=1600-2000^{\circ}\text{K}$. Обеспечение $\alpha < 1$ в восстановительной зоне достигается вводом горючего, а $\alpha > 1$ — вводом кислорода или воздуха. Поддержание вышеуказанных диапазонов температур наиболее целесообразно осуществлять строго дозированным впрыском воды. Особо следует отметить, что впрыскиваемая вода играет не только роль охладителя, но и является химически активным реагентом, так как образующиеся при



Фиг. 3



Фиг. 4

диссоциации радикалы Н и ОН существенно ускоряют процесс нейтрализации.

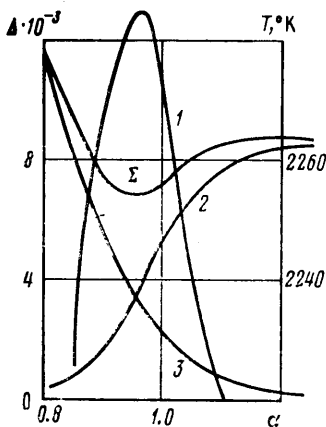
Вышеуказанные рекомендации были использованы на нескольких объектах, выбрасывающих высокотемпературные продукты сгорания кислородно-керосинового топлива с коэффициентом избытка окислителя $\alpha=0.76$. Использование дожигателя окиси углерода с тремя поясами впрыска: вода — кислород (воздух) — вода, обеспечивающими соответственно значения температур $1800-2000-1600^{\circ}\text{K}$ и суммарное значение коэффициента избытка окислителя в смеси на выходе $\alpha=1.05$, позволило снизить содержание окиси углерода в 25 раз и практически предотвратить образование окислов азота.

На фиг. 3 представлена расчетная зависимость относительного весового расхода m_{CO}^0 (расход отнесен к расходу топлива) от относительного расхода впрыскиваемой воды $m_{\text{H}_2\text{O}}^0$. Цифры 1, 2, 3 относятся к поясам впрыска, при этом в поясах 1 и 3 вводится вода, а в поясе 2 — кислород. Отметим, что кривая 1 имеет минимум, который связан с неравновесным протеканием химических реакций. Действительно, подвод значительного количества воды приводит к полному замораживанию реакции, при этом уровень СО соответствует исходному, поскольку не происходит его дожигания. С другой стороны, при относительно малых количествах вводимой воды возникают активные радикалы, которые способствуют дожиганию СО в процессе цепных реакций (см. таблицу). Отметим, что на нисходящей ветви кривой 1 течение на весьма малой длине становится равновесным. Из фиг. 3 следует также, что для максимальной нейтрализации СО важен именно дозированный подвод воды в количестве, соответствующем минимуму кривых 1 и 3.

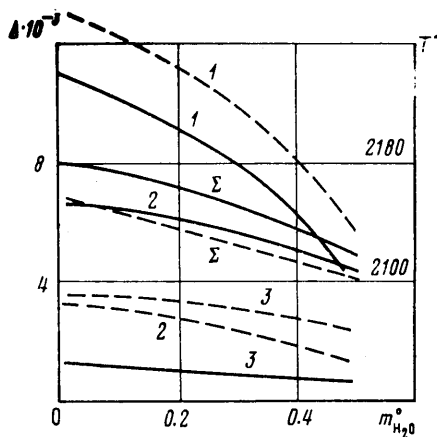
Аналогичный подход был использован при рассмотрении проблемы нейтрализации токсичных компонент в парогенераторах ТЭС, хотя в этом случае имеются некоторые отличия [2], в частности продукты сгорания поступают в канал по нормали к стенке, что создает на начальном участке заметную неоднородность потока. Кроме того, уровень температур и скоростей существенно ниже и, наконец, при расчете неравновесного течения в канале парогенератора необходимо учитывать теплоотвод в стен-

ки, что может оказать существенное влияние на уровень концентраций. Рассмотрим зависимость температуры, молярных долей основных токсичных компонент CO и NO от коэффициента избытка окислителя сразу после сгорания. Будем предполагать, что имеет место мгновенное перемешивание горючего и окислителя и равновесное протекание химических реакций.

Типичные зависимости температуры (кривая 1), молярных долей r_{CO} (кривая 3) и r_{NO} (кривая 2) от α представлены на фиг. 4. Отметим характерные особенности этих зависимостей. Максимум температуры (око-



Фиг. 5



Фиг. 6

ло 2300° K) имеет место не при стехиометрическом соотношении $\alpha = 1$, а при $\alpha = 0.95$. Смещение максимума в сторону меньших α связано с явлением диссоциации продуктов сгорания.

Из фиг. 4 следует, что максимальное значение концентрации r_{NO} достигается при $\alpha = 1.15$, в то время как при $\alpha < 0.85$ (с $T < 2000^\circ \text{K}$) NO практически отсутствует. С другой стороны, концентрация CO монотонно убывает с увеличением α и близка нулю при $\alpha > 1.1$. Представляет существенный интерес фиг. 5, на которой с использованием данных фиг. 4 построены зависимости от α концентраций CO и NO в долях предельно допустимых концентраций (ПДК) Δ , при этом сумма концентраций CO и NO построена в предположении равного приоритета этих токсичных компонент при таком суммировании. Рассмотрение этой последней зависимости показывает, что минимум суммы ПДК достигается при $\alpha = 0.95$. Известно, что современные ТЭС работают при $\alpha = 1.05$. Поэтому переход к режиму $\alpha = 0.95$, согласно данным фиг. 4 и 5, приведет к увеличению энергоудельного расхода, экономии топлива и одновременно к уменьшению суммарного ПДК на 10–15% без каких-либо конструктивных мероприятий. Предварительные эксперименты, в которых измерялись концентрации компонент и энергоудельный расход, подтверждают представленные рекомендации. Очевидно, однако, что отмеченное снижение токсичных компонент на 10–15% не является решающим. Рассмотрим в связи с этим влияние ввода воды на концентрации токсичных компонент. Будем предполагать, что вода в жидкой или паровой фазе тем или иным способом смешивается с горючим. По-прежнему будем предполагать, что имеет место мгновенное перемешивание горючего и окислителя и равновесное протекание химических реакций. На фиг. 6 построены зависимости температуры и концентрации CO и NO в долях ПДК от m^0 , где m^0 — весовая доля воды

Температура вводимой воды принималась равной 400°K , а подвод воды осуществлялся для составов, соответствующих $\alpha = 0.95$ и 1.05 . Очевидно, что добавление воды в топливо уменьшает температуру сгорания, но одновременно снижает и концентрации NO и CO . Уменьшение концентрации NO связано непосредственно с уменьшением температуры, а концентрации CO — с увеличением окислительных элементов при подводе воды. Из фиг. 6 следует, что при добавлении воды в количестве $m^{\circ} = 0.45$ при $\alpha = 0.95$ температура продуктов сгорания равна температуре при $\alpha = 1.05$ и $m^{\circ} = 0$, т. е. температуре, соответствующей рабочему режиму современных ТЭС. При этом происходит изменение суммарного ПДК на 30%, а уменьшение концентрации NO в 2–2,5 раза. Хотя в этом случае имеет место увеличение концентрации CO , однако нейтрализацию CO за счет дозированного ввода воды можно осуществить способом, описанным выше.

Существенными специфическими особенностями с точки зрения образования токсичных компонент обладают автомобильные двигатели [3]. В отличие от процессов, рассмотренных выше, в которых течение предполагалось стационарным, течение в дизеле и двигателях с искровым зажиганием носит существенно нестационарный характер, при этом полное описание картины течения требует привлечения общей системы уравнений (1)–(7)

Действительно, течение в отдельных участках двигателя носит существенно пространственный и нестационарный характер, при этом важен учет как двухфазности течения, так и неравновесного протекания химических реакций. Однако, как уже отмечалось, даже численное решение полной системы уравнений (1)–(7) весьма затруднительно, поэтому для изучения некоторых качественных закономерностей необходимо сделать упрощающие предположения. Так, на участке смешения горючего с воздухом можно принять течение стационарным и одномерным, не учитывая физико-химических превращений, но обязательно учитывать двухфазность течения. Состав смеси после воспламенения можно определить по соотношениям равновесной термодинамики. В то же время при расчете параметров в цилиндре при прямом и обратном ходе поршня необходимо учитывать нестационарность течения, неравновесное протекание химических реакций, но можно принять течение однофазным и одномерным. При истечении отработанных продуктов сгорания через клапан течение в канале можно считать стационарным и двумерным по аналогии с течением в кольцевых соплах реактивных двигателей. Конечная цель исследования состоит в определении концентраций токсичных компонент в отработанном топливе, в нахождении их, а также термодинамических параметров смеси, как функций времени и таких параметров двигателя, как степень сжатия, числа оборотов, синхронизации зажигания, коэффициента избытка окислителя и геометрии. Ниже излагаются два подхода к решению поставленной задачи. В первом подходе (так называемом нуль-мерном приближении) в предположении постоянства параметров по объему, но с учетом переменного объема камеры, для нахождения химических и газодинамических параметров используются интегральные законы сохранения массы, импульса и энергии и уравнения химической кинетики. На фазе всасывания и выхлопа учитывается наличие подвода и отвода массы соответственно. Возможен также учет тепла, отводимого в стенки цилиндра и поршень, путем численного решения уравнения теплопроводности.

Во втором подходе при расчете нестационарного течения в цилиндре при движении поршня решаются одномерные нестационарные уравнения газовой динамики с учетом неравновесного протекания химических реакций. Закон движения поршня задается. Расчет течения в плоскости t, x может быть проведен для всех тактов двигателя. Численное решение осуществляется методом характеристик, поскольку система уравнений в этом случае является гиперболической.

Предварительные расчеты показывают, что в процессе быстрого нестационарного течения в цилиндре происходит замораживание концентрации NO по аналогии с тем, что имеет место в соплах реактивных двигателей (фиг. 1). Этот факт находится в соответствии с имеющимися экспериментальными измерениями концентрации NO в автомобильных двигателях [3]. Заметим еще, что представления об уровне температур и

начальном распределении концентраций компонент в цилиндре можно получить из фиг. 4. Отметим, что лишь для дизельных двигателей характерны значения $\alpha=1.3-1.4$, а для двигателей с искровым зажиганием $\alpha=1$. Для оценок влияния подачи воды в топливо на энергетические характеристики и концентрации компонент могут быть использованы данные фиг. 4-6.

Токсичные компоненты, образующиеся в описанных выше устройствах, далее выбрасываются в атмосферу. В связи с этим важной проблемой является распространение их в атмосфере вблизи выхлопных устройств. Как уже отмечалось, одним из способов исследования этой проблемы является численное решение системы (8) — (13). При попадании продуктов сгорания в атмосферу происходит их диффузия в окружающее пространство, частичное дожигание и т. д.

В работе [4] описан метод численного решения системы (8) — (13) в случае турбулентной изобарической струи с неравновесными химическими реакциями, представленными в таблице. Отмечена важность учета кинетики реакций и показано, что профили поперечных температур имеют максимум, связанный с наличием догорания. Метод работы [4] может быть использован для количественного прогнозирования содержания токсичных компонент вблизи выхлопных устройств.

Поступила 10 VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течения газа в соплах. Изд-во МГУ, 1978.
2. Энергетика и охрана окружающей среды. М., «Энергия», 1979.
3. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М., «Машиностроение», 1973.
4. Рускол В. А., Пирумов У. Г. Изобарическая турбулентная реагирующая струя, истекающая в спутный поток. Докл. АН СССР, 1977, т. 236, № 2.