

## О ПРИБЛИЖЕННОМ ОГНЕВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВ

НОРКИН Н. Н.

### 1. Введение

Физико-химический процесс вообще и горение газов в частности есть совокупность явлений химической кинетики, гидродинамики, теплопередачи и др., поэтому успешное перенесение результатов исследования из обстановки одного масштаба в обстановку другого масштаба по схеме

$$\text{Модель (М)} \rightarrow \text{Производство (П)} \quad (1)$$

возможно лишь при условии комплексного изучения процесса. Связующим звеном в этой схеме является научное проектирование (пр), тогда развернутое представление о задаче применения теории подобия к исследованию процессов может быть выражено

$$\text{М} \rightarrow \text{пр} \rightarrow \text{П} \quad (2)$$

Следовательно одной из непосредственных задач научного переноса является разработка метода выполнения промежуточного звена, т. е. проектирования; теоретической и экспериментальной базой проектирования должна явиться теория подобия и моделирование.

Ввиду сложной связи между основными и сопутствующими явлениями, чисто аналитическое нахождение функциональной зависимости между характерными чертами явлений невозможно; необходимы опытные исследования. Теория подобия указывает направление опытного исследования и дает метод математической обработки результатов исследования. Моделирование, давая возможность выявить опытом количественные связи изучаемых явлений, позволяет установить обобщенные закономерности.

Благодаря обширным и плодотворным работам академика М. В. Кирпичева и его школы [1] теория подобия и метод моделирования успешно применяется к исследованию разнообразных физических явлений, как-то: гидро-аэродинамические явления, теплопередача и др. В последнее время в этой области появляются работы, ставящие целью применить общую теорию подобия к исследованию физико-химических явлений, при протекании которых изменяется физическая и химическая природа исходных веществ, т. е. начинают закладываться основы теории физико-химического подобия.

Наиболее полным в этом отношении является исследование Г. А. Дьяконова [2]. Им проанализирована система основных уравнений и условия однозначности физико-химических процессов, а также выведены два новых критерия подобия: критерий квазистатичности и критерий контакта.

Сформулировав условия подобия, Г. А. Дьяконов приходит к выводу, что в сложных случаях превращения (обратимый процесс и многокомпонентная

система) точное подобие двух явлений может быть достигнуто только при превращении одних и тех же исходных продуктов, при одинаковых температурах процесса; но при некоторых, вполне допустимых упрощениях, т. е. при применении приближенного моделирования, границы возможных обобщений расширяются.

Некоторые исследователи [3] считают, что перенос опытного модельного процесса в промышленные условия с соблюдением всех требований, налагаемых теорией подобия, имеет значение лишь при 2—5-кратном увеличении производительности аппаратуры. Вследствие этого при более высоком увеличении производительности следует осуществлять перенос модельного процесса в группу параллельно-работающих аппаратов. Такое обобщающее заключение, не подкрепленное экспериментальными данными, несомненно, не является убедительным.

При этом также делается вывод о весьма ограниченных возможностях теории подобия при изучении химических процессов, применяя анализ подобия к системам с необратимыми химическими превращениями.

Теория и метод огневого моделирования горения газов недостаточно разработаны. При исследовании турбулентно-диффузионного горения газов Г. П. Иванцев [4], А. М. Петунии, С. Н. Сыркин [5] (ЦКТИ) осуществляли огневое моделирование лишь при соблюдении условий: а) одинаковые температуры в образце и модели, б) одно и то же топливо и в) одинаковый гидродинамический режим. Указанные исследователи считают, что при высоких температурах топочного процесса скорость химического превращения настолько велика, что она не только не является лимитирующим фактором, а приводит явление в модели и образце как бы к отсутствию различия (к автомодельности), поэтому, по их мнению, главным фактором, определяющим процесс горения, является турбулентное перемешивание горючего с воздухом. Вследствие этого из анализа упускаются критерии химического превращения и рассматриваются лишь критерии гидродинамического характера.

Однако нам представляется, что при моделировании огневых процессов нельзя ограничивать применение теории подобия лишь областью гидродинамических явлений и, в частности, лишь вопросами турбулентного перемешивания, т. к. некоторые формы сжигания газа вообще не зависят от перемешивания в процессе горения (например, поверхностное, беспламенное горение); химизм процесса в этом случае играет решающую роль. Автор данной работы сделал попытку применить теорию подобия к моделированию ламинарно-диффузионного горения и поверхностного каталитического (беспламенного) горения и пришел к выводам о возможности значительного расширения условий моделирования.

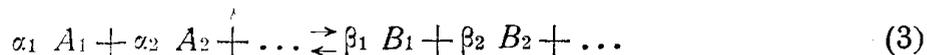
## **II. Система основных уравнений стационарных процессов горения газов**

В систему основных уравнений, представляющих собою как бы математические модели классов явлений, обуславливающих физико-химический процесс горения, входят следующие уравнения:

- I — стехиометрическое уравнение химической реакции;
- II — кинетическое уравнение химической реакции;
- III — уравнение материального обмена;
- IV — уравнение энергетического (теплового) обмена;
- V — уравнение пропорциональности между количеством превращающихся веществ и теплотой превращения;
- VI — уравнение материальной связи между процессами превращения и обмена;

- VII — уравнение тепловой связи между процессами превращения и обмена;  
 VIII — уравнение движения материальных потоков;  
 IX — уравнения материального и энергетического обмена на внешних границах реакционной системы.

Стехиометрическое уравнение химической реакции, являющееся следствием из принципа сохранения материи, описывает схему химических превращений, природу и число реагирующих компонент



здесь  $A_1, A_2$  — химические компоненты, вступающие в реакцию;

$\alpha_1, \alpha_2$  — стехиометрические числа превращений химических компонент, вступающих в реакцию;

$B_1, B_2$  — химические компоненты, образующиеся в результате реакции;

$\beta_1, \beta_2$  — стехиометрические числа превращений химических компонент, образующихся в результате реакции.

Стехиометрическое уравнение, фиксирующее природу реагирующих и получающихся веществ, является тождественным для класса подобных явлений и, таким образом, исключает возможность подобия физико-химических процессов между различными по своей природе химическими реагентами. Иная постановка вопроса может привести к исследованию некоего символического процесса, вместо действительного, и перенос результатов исследований этого символического процесса на действительный был бы незакономерным. С этой точки зрения вряд ли целесообразны такие направления в работах, как моделирование горения угля растворением соды в воде. Конечно, не исключена возможность замены природы реагентов и схемы химических превращений при решении некоторых частных вопросов из внешней обстановки, сопутствующей химическому превращению, что иногда и делается по методу аналогий, например гидро-электроанalogии, тепло-электроанalogии.

Требование тождества уравнения (3) для группы подобных явлений не является препятствием при моделировании горения газовых смесей к замене одного вида горючей газовой смеси другим видом, например, водяной газ и светильный газ и др., так как для большинства промышленных горючих газов число химических компонент довольно ограничено (водород, окись углерода, метан), и с точки зрения состава, но не технологии производства, промышленные горючие газы отличаются друг от друга лишь количественными соотношениями между этими тремя компонентами.

Кинетическое уравнение химической реакции, являющееся скрытым выражением принципа сохранения импульса, устанавливает, что мгновенное значение скорости превращения пропорционально, во-первых, концентрации превращающихся веществ, во-вторых, степенной функции от температуры и, в третьих, зависит от величины энергии активации.

В общем виде для гомогенной обратимой газовой реакции это уравнение выражается

$$U_n = \frac{DC_i}{d\tau} = K_1 f_1(C_{A_1} \cdot C_{A_2} \dots) - K_2 f_2(C_{B_1} \cdot C_{B_2} \dots) \quad (4)$$

Здесь  $U_n = \left( \frac{\text{моль}}{\text{см}^3 \text{сек}} \right)$  — скорость химического превращения;

$C_i = \left( \frac{\text{моль}}{\text{см}^3} \right)$  — концентрация компоненты  $i$ ;

$C_{A_1}, C_{A_2} - \left( \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3} \right)$  — мгновенное значение концентрации компонент, вступающих в реакцию;

$C_{B_1}, C_{B_2} - \left( \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3} \right)$  — тоже компонент, образующихся в ходе реакции;

$f_1 (C_{A_1} \cdot C_{A_2} \dots)$  — функция концентрации реагирующих веществ; вид функции зависит от механизма превращения (от порядка реакции и др.);

$f_2 (C_{B_1} \cdot C_{B_2} \dots)$  — тоже получающихся веществ;

$K_1$  — константа скорости прямой реакции;

$K_2$  — константа скорости обратной реакции.

При этом.

$\frac{DC_i}{d\tau}$  — субстанциональная производная, равная для поточной

системы:

$$\frac{DC_i}{d\tau} = \frac{\partial C_i}{\partial \tau} + w \frac{\partial C_i}{\partial x}$$

Для стационарных процессов, протекающих в аппаратуре с одним характерным измерением

$$\frac{DC_i}{d\tau} = w \frac{\partial C_i}{\partial x}$$

Процессы горения газов могут быть приближенно отнесены к группе предельно-нестатических (необратимых) процессов, т. к. скорости обратных реакций имеют практически небольшое значение лишь при температуре выше 1700°C.

Так, по Нернсту и Вартенбергу [6] степень диссоциации водяного пара, т. е. реакция, обратная горению водорода, в интервале температур 2000°K ÷ 2500°K составляет от 0.582% до 4.21% (весовых). Вследствие этого уравнение (4) упрощается за счет выпадения члена  $K_2 f_2 (C_{B_1} C_{B_2} \dots) = 0$ .

Кроме того, если принять положение академика Н. Н. Семенова, что для большинства гомогенных газовых реакций горения скорость реакций пропорциональна не только мгновенному количеству превращающегося вещества, но также и мгновенному количеству уже превращенного вещества, то механизм реакции горения и значение функции  $f_1 (C_{A_1} \cdot C_{A_2} \dots)$  становятся более определенными, т. е.

$$f_1 (C_{A_1} \cdot C_{A_2} \dots) = (C_{0A_1} - C_{\tau A_1}) C_{\tau A_1} \cdot (C_{0A_2} - C_{\tau A_2}) C_{\tau A_2} \quad (5)$$

Здесь кроме предыдущих обозначений, введены:

$C_{0A_1} - \left( \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3} \right)$  — начальная концентрация компоненты  $A_1$ ;

$C_{0A_2} - \left( \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3} \right)$  — тоже компоненты  $A_2$ ;

$C_{\tau A_1} - \left( \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3} \right)$  — изменение концентрации компоненты  $A_1$  к данному моменту времени;

$C_{\tau A_2}$  — тоже компоненты  $A_2$ .

Таким образом, для стационарного процесса горения газов, уравнение [4] приближенно может быть заменено следующим:

$$U_n = w \frac{\partial C_i}{\partial x} = K_1 (C_{0A_1} - C_{\tau A_1}) C_{\tau A_1} \cdot (C_{0A_2} - C_{\tau A_2}) C_{\tau A_2} \quad (6)$$

Подставив значение  $K$  — константы скорости химической реакции по закону Аррениуса

$$K = A e^{-E/RT}$$

получим

$$U_n = w \frac{\partial C_i}{\partial x} = A (C_{0A_1} - C_{\tau A_1}) C_{\tau A_1} \cdot (C_{0A_2} - C_{\tau A_2}) C_{\tau A_2} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (7)$$

Уравнение материального обмена, обеспечивающего доставку в систему реагирующих веществ и удаление из системы образующихся продуктов реакции, может быть представлено в следующем виде:

$$U_0 = - \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial w C_i}{\partial \beta} + \sum_{\beta=x,y,z} D \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \right) \quad (8)$$

Здесь  $U_0$   $\left( \frac{\text{моль}}{\text{см}^3 \text{сек}} \right)$  — скорость материального обмена,

$w$   $\left( \frac{\text{см}}{\text{сек}} \right)$  — линейная скорость перемещения материального потока;

$D$   $\left( \frac{\text{см}^2}{\text{сек}} \right)$  — коэффициент диффузии компоненты;

член  $\sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial w C_i}{\partial \beta}$  — характеризует интенсивность поточного переноса;

член  $\sum_{\beta=x,y,z} D \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \right)$  — характеризует интенсивность диффузионного переноса.

Уравнение энергетического теплового обмена внутри системы, выражающее связь между теплосодержанием системы, теплом поточного (конвективного) переноса, теплом кондукции и радиации, имеет вид

$$Q_0 = \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \beta} \right) + \sum_{\beta=x,y,z} (\alpha \Delta t) + \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial}{\partial \beta} \left[ C_s \varphi \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] + \sum_{\beta=x,y,z} C_p w \frac{\partial T}{\partial \beta} \quad (9)$$

Здесь  $Q_0$   $\left( \frac{\text{ккал}}{\text{см}^3 \text{сек}} \right)$  — скорость теплообмена в единицу времени в единице; объема реакционной системы;

$C_p$   $\left( \frac{\text{ккал}}{\text{г гр}} \right)$  — теплоемкость текущей среды при постоянном давлении;

$\gamma$   $\left( \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$  — удельный вес текущей среды,

$t, T$  (гр) — температура текущей среды;

$\lambda$   $\left( \frac{\text{ккал}}{\text{м сек гр}} \right)$  — коэффициент теплопроводности текущей среды;

$C_s$  — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$\varphi$  — степень черноты текущей среды;

Уравнение пропорциональности между теплотой превращения и количеством превращающихся веществ, как следствие применения принципа сохранения энергии в условиях химического процесса, имеет вид.

$$-q \left[ \frac{\partial w C_i}{\partial \beta} + \sum_{\beta=x,y,z} D_i \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \right) \right] = Q_0 + \sum_{\beta=x,y,z} C_p w \gamma \frac{\partial T}{\partial \beta} \quad (10)$$

Здесь, кроме ранее указанных обозначений,

$q$  —  $\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$  — тепловой эффект превращения компоненты.

Связь между процессами превращения и обмена характеризуется 2 уравнениями: а) уравнением материальной связи и б) уравнением энергетической (тепловой) связи. В условиях стационарного превращения, когда должно существовать динамическое равновесие между процессами превращения и обмена, очевидно, что скорости превращения и обмена равны между собою, т. е.

$$U_n = U_0 \quad (11)$$

При использовании этого уравнения необходимо иметь в виду, что обменные процессы, характеризуемые членами правой части уравнения (11) играют соподчиненную роль для кинетических процессов; это значит, что произвольное задание значений величин обменного процесса является недопустимым. В процессах горения произвольное задание обменных величин не влечет за собою регулирование кинетики процесса, а ведет к нарушению устойчивости процесса. Так, если обменные скорости процесса являются меньшими, чем скорость химической реакции горения, то это приведет к нарушению непрерывности процесса; вместо непрерывного горения будут иметь место повторяющиеся взрывы, хлопки; если же обменные скорости процесса будут большими, чем скорость химической реакции, то это приведет также к нарушению непрерывности процесса, т. к. произойдет прекращение горения, вследствие „задувания“ пламени, или отрыв и рассеивание пламени.

Уравнение энергетической (тепловой) связи в общем виде будет

$$qU_n = Q_0 \quad (12)$$

Уравнение движения, характеризующее взаимодействие сил инерции, силы тяжести, внешнего давления и внутреннего трения, есть общеизвестное уравнение движения Навье-Стокса.

Уравнение материального обмена на границах системы характеризует взаимодействие движущейся реакционной газовой системы с окружающей средой. Если процесс химического превращения происходит во всем объеме реакционного пространства, ограниченного ограждающими поверхностями, тогда материальный обмен на границах системы отсутствует и каждый член уравнения, характеризующего материальный перенос по отдельности равен нулю. Если процесс химического превращения распространяется не по всему объему реакционного пространства, а имеет лишь локальное значение, тогда взаимодействие движущейся реакционной газовой системы с окружающей средой может выразиться в изменении концентрации реагирующих веществ вследствие вовлечения в основной движущийся поток вторичного воздуха или инертных газов (продуктов горения) из окружающей среды.

В этом случае условия материального обмена на граничной поверхности могут характеризоваться уравнением турбулентного переноса количества движения (7)

$$E = l^2 \frac{dw}{dx}$$

Здесь  $E - \left( \frac{M^2}{\text{сек}} \right)$  — кинематический коэффициент обмена, имеющий размерность коэффициента диффузии;  
 $l$  (м) — длина пути перемешивания в направлении перпендикулярном движению газа или иначе, ширина области, охваченной турбулентным движением, измеренная от оси потока;  
 $w \left( \frac{M}{\text{сек}} \right)$  — скорость основного потока;  
 $x$  — (м) — расстояние от оси основного потока.

Условиями однозначности, отмечающими индивидуальность явлений, принадлежащих к одному классу физико-химических превращений (в данном случае к классу горения газов), являются следующие: а) состав реагирующих веществ и стехиометрическая формула превращения; б) механизм превращения; в) поля концентраций, температур, физических констант и скоростей движения исходных веществ в начальный момент превращения; г) законы изменения физических констант в процессе превращения; д) конкретность условий геометрической обстановки как внутри реакционной системы, так и относительно внешней среды.

Одни из этих условий при моделировании должны быть тождественными, другие — подобными. Так, состав реагирующих веществ и стехиометрическая формула превращения по условию (а) и механизм превращения по условию (б) должны быть тождественными для моделируемых явлений, это требование исключает возможность моделирования явлений различной химической природы. Однако, если принять во внимание, как уже отмечалось выше, что разнообразие состава наиболее распространенных промышленных горючих газов обусловлено главным образом лишь различными соотношениями между водородом  $H_2$ , окисью углерода  $CO$  и метаном  $CH_4$  и затем учесть, что  $H_2$  и  $CO$  имеет одну и ту же стехиометрическую формулу превращения и один и тот же порядок и механизм горения, то вследствие этих обстоятельств не возникает препятствий к осуществлению приближенного моделирования газовых смесей различного химического состава. Остальные условия однозначности должны быть подобными, т. е. условия (в), (г) и (д); но при практическом осуществлении приближенного моделирования может возникнуть необходимость в отказе от некоторых малосущественных зависимостей и связей, что повлечет за собой некоторое искажение точного подобия; степень искажения подобия устанавливается опытом и в дальнейшем учитывается введением дополнительных к критериям подобия безразмерных симплексов.

### III. Критерии подобия приближенного огневого моделирования

Критериями подобия, численные значения которых должны быть одинаковыми для моделируемых процессов, являются: критерии физико-химического превращения, критерии материального и теплового обмена и гидродинамические. В условиях стационарного физико-химического процесса не возникает необходимости в независимом рассмотрении уравнений превращения и уравнений обмена, т. к. динамическое равновесие процессов превращения и обмена требует равенства скоростей превращения и обмена, вследствие чего число критериев значительно сокращается. Затем необходимо указать, что горение газовых смесей может быть отнесено к категории предельно нестатических процессов с предельно сдвинутым равновесием в сторону конечных продуктов превращения, поэтому критерий квазистатично-

сти (как мера отношения скоростей прямой и обратной реакции и связь между концентрациями исходных и конечных продуктов превращения) и критерий контакта по системе Г. К. Дьяконова (ЭНИН АН СССР) естественно для решения поставленной задачи в дальнейшем не рассматриваются.

Стехиометрическое уравнение химической реакции (3) не дает критериев подобия, т. к. моделируемые процессы имеют одну и ту же стехиометрическую формулу превращения.

Кинетическое уравнение химической реакции (7) и уравнение материального обмена (8) объединяются для стационарных процессов в уравнение материальной связи между процессами превращения и объема:

$$U_n = - \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial w C_i}{\partial \beta} + \sum_{\beta=x,y,z} D \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \right) \quad (14)$$

Из этого уравнения получаются обменно-кинетические критерии:

$$K_I = \frac{wC}{lU_n}; K_{II} = \frac{DC}{l^2 U_n} \text{ и производный } K_{III} = \frac{wl}{D}$$

Входящая в эти критерии величина  $U_n$ —скорость физико-химического превращения для процессов горения может быть определена по теории теплового распространения пламени (Н. Н. Семенов, Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий) из уравнения:

$$U_n = \frac{\partial}{\partial \beta} \left[ \sqrt{\frac{n \lambda A e^{-E/RT_1} \gamma C}{q(T_1 - T_0)^m} \left( \frac{RT_1}{E} \right)^p} \right]_{\beta=x,y,z} \quad (15)$$

причем для реакции 1 порядка  $n=2$ ;  $c=1$ ;  $m=1$ ;  $p=2$   
реакции 2 порядка  $n=4$ ;  $c=c_0$ ;  $m=2$ ;  $p=3$ .

Кинетическое уравнение (7) и уравнение теплового обмена (9) объединяются для стационарных процессов в уравнение тепловой связи:

$$qU_n = \sum_{\beta=x,y,z} \left[ \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \beta} \right) \right] + \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial}{\partial \beta} (\alpha \Delta t) + \\ + \sum_{\beta=x,y,z} \frac{\partial}{\partial \beta} \left[ c_s \varphi \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] + \sum_{\beta=x,y,z} c_p w \frac{\partial T}{\partial \beta} \gamma \quad (16)$$

Из этого уравнения получаются обменно-кинетические критерии:

$$K_{IV} = \frac{\lambda t}{l^2 q U_n}; K_V = \frac{\alpha t}{l q U_n}; K_{VI} = \frac{c_s \varphi T^4}{l q U_n}; K_{VII} = \frac{c_p \gamma w T}{l q U_n}.$$

Критерии  $K_{IV}$ ,  $K_V$  и  $K_{VI}$  характеризуют долю обменного тепла всеми видами теплопередачи относительно тепла химической реакции и  $K_{VII}$ —долю тепла на изменение теплосодержания газов.

Исключение величины  $qU_n$  дает обычные критерии теплового обмена ( $Pe$ ,  $B_0$ ).

Объединив уравнение материальной и тепловой связи (14 и 16), получим уравнение пропорциональности между количеством превращающихся веществ и теплотой превращения:

$$-q \left[ \frac{\partial w C_i}{\partial \beta} + \sum_{\beta=x,y,z} D_i \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \beta} \right) \right] = Q_0 + \sum_{\beta=x,y,z} c_p w \gamma \frac{\partial T}{\partial \beta} \quad (17)$$

Критерии, получающиеся из этого уравнения, следующие:

$$K_{VIII} = \frac{q C_i}{\gamma c_p T}; K_{IX} = \frac{q DC}{\gamma l c_p w T} \text{ и производный } K_{III} = \frac{wl}{D}$$

Критерий  $K_{VII}$  характеризует пропорциональность полей концентраций и температур в направлении движения пламенных газов;  $K_{IX}$  — тоже в направлении диффузии и производный.  $K_{III}$  — соотношение между поточным и диффузионным переносом материальной системы.

Из уравнения движения материальных потоков получаются обычные критерии:

$$Re = \frac{\omega l}{\nu}; \quad Ar = \frac{l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot g \quad \text{и} \quad Eu = \frac{\Delta P}{\rho \omega^2}$$

Из уравнений материального и энергетического обмена на внешних границах реакционной системы (13) получаются критерии: материального обмена из уравнения турбулентного переноса количества движения

$$K_x = \frac{E}{l \omega}$$

и теплового обмена, аналогично критериям  $Pe$ ,  $Nu$ ,  $Bo$ .

Критерий турбулентного переноса количества движения уместно использовать для характеристики явлений, связанных с турбулентным перемешиванием на границах системы, например, при рециркуляции топочных газов с факелом пламени, при горении в незамкнутой системе и др. Критерии теплового обмена на границах замкнутой системы иногда можно заменить КПД установки, учитывающим теплотери во внешнюю среду.

Общий интеграл системы основных уравнений может быть решен в форме функциональной связи между определяющими и определяемыми критериями. Выбор того или иного из определяемых критериев является произвольным, в зависимости от целевой установки намечаемого экспериментального исследования и формы горения газа. В дальнейшем анализ связи между критериями выполнен для 2-х форм горения газов: для ламинарно-диффузионного и для поверхностного каталитического (беспламенного) горения.

При осуществлении приближенного огневого моделирования факельного ламинарно-диффузионного горения, учитывая характерные особенности этой формы горения, можно исключить из рассмотрения следующие критерии:

$$K_I = \frac{\omega C}{l U_n}; \quad K_{III} = \frac{\omega l}{D}; \quad K_{IV} = \frac{i t}{l^2 q U_n}; \quad K_V = \frac{\alpha t}{l q U_n}$$

и все критерии движения, вследствие того что:

а) критерии  $K_I$  и  $K_{III}$  связаны с поточным переносом, но ламинарно-диффузионное горение зависит преимущественно от диффузионного переноса материи и тепла;

б) на том же основании можно не рассматривать критерии  $K_{IV}$  и  $K_V$ , т. к. преимущественный вид теплопередачи — излучение; что же касается переноса тепла внутри факела кондукцией, то роль кондукции отражена в кинетической формуле с помощью величины  $U_n$ , рассчитываемой по теории теплового распространения пламени;

в) вследствие автомодельности ламинарных потоков при любом значении  $Re$  меньшем критического, требование  $Re = idem$  является необязательным; однако, геометрическое подобие моделируемых явлений должно обеспечить обязательное условие  $Re < 2320$ . Затем следует отметить, что при свободном диффузионном развитии пламени значение критерия  $Eu$  не является существенным. Может представить интерес явление искривления оси факела в вертикальной плоскости; в этом случае существенное значение имеет критерий  $Ar$ .

Следовательно, явление ламинарно-диффузионного горения в основных чертах характеризуется функциональной связью между критериями:

$$K_{II} = \frac{DC}{l^2 U_n}; K_{VI} = \frac{C_s \varphi T^4}{l q U_n}; K_{VII} = \frac{C_p \gamma \omega T}{l q U_n}; K_{VIII} = \frac{qC}{\gamma C_p T}; K_{IX} = \frac{qDC}{\gamma l C_p \omega T}$$

и условие  $Re < 2320$ ;

но так как

$$\frac{K_{VIII}}{K_{IX}} \cdot \frac{\nu}{Re \cdot D} = Pr' \text{ и } \frac{K_{VII}}{K_{VI}} = \frac{C_p \gamma \omega}{C_s \varphi T^3} = Bo,$$

то уравнение подобия для характеристики основных черт ламинарно-диффузионного горения принимает вид

$$K_{II} = f(Pr', Bo) \text{ при } Re < 2320$$

или

$$\frac{DC}{l^2 U_n} = f(Pr', Bo) \text{ при } Re < 2320 \quad (18)$$

Линейный размер  $l$  следует брать в направлении диффузии, т. е. толщину диффундирующих слоев.

Моделирование для отыскания функциональной связи в вышеприведенной форме уравнения подобия позволит установить закономерность в изменении относительной длины факела в направлении движения  $\frac{L_m}{L_n}$  в зависимости от диффузионно-кинетических условий, свойств материальной системы ( $Pr'$ ), теплоотдачи излучением ( $Bo$ ) и толщины диффундирующих слоев газа ( $l$ ), т. е. решать основной вопрос, имеющий существенное практическое значение при диффузионном горении.

Явление поверхностного каталитического (беспламенного) горения в основных чертах характеризуется взаимной связью между критериями:

$$K_I = \frac{\omega C}{W_n}; K_V = \frac{a t_{\text{ст}}^2}{l q U_n}; K_{VI} = \frac{C_s \varphi T^4}{l q U_n}; K_{VII} = \frac{C_p \gamma \omega T}{l q U_n};$$

$$K_{VIII} = \frac{qC}{\gamma C_p T}; Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} \text{ и } Eu = \frac{\Delta P}{\rho \omega^2}$$

Остальные критерии могут быть исключены из рассмотрения ввиду незначительного влияния их на существенные черты явления при осуществлении приближенного огневого моделирования.

Количество критериев, подлежащих рассмотрению, может быть уменьшено путем их преобразования;

$$\frac{K_V}{K_{VI}} = \frac{a}{C_s \varphi T^3} = Bo'$$

показывает соотношение между конвективной и радиационной составляющими внешнего теплообмена.

Критерий  $\frac{K_I}{K_{VII}} = K_{VII} = \frac{\omega C_p \gamma T}{l q U_n}$

устанавливает соотношения между теплосодержанием газов (продуктов горения) и теплотой горения. Отношение  $\frac{C_p \gamma T}{q}$  представляет собою пи-

рометрический коэффициент горения  $\eta$ , поэтому вместо критериев  $K_I$ ,  $K_{VII}$  и  $K_{VIII}$  вводится один новый

$$K_{XI} = \eta \cdot \frac{w}{lU_n},$$

который показывает связь между пирометрическим коэффициентом горения и скоростью распространения пламени.

Гидродинамические критерии  $Re$  и  $Eu$  имеют существенное значение. От величины критерия  $Re$  зависит эпюра скоростей и деформация фронта пламени (конический фронт пламени при больших значениях  $Re$  превращается почти в плоский). Величиною критерия  $Eu$  определяется сопротивление каталитической системы и необходимое давление.

Таким образом, основные черты поверхностного каталитического горения характеризуются зависимостью между критериями:

$$Bo'; \quad \eta \frac{w}{lU_n}; \quad Re \text{ и } Eu.$$

Линейный размер  $l$ , входящий в критерий, характеризует длину канала в каналовой горелке, на поверхности которого происходит горение; для горелок из зернистого слоя  $l$  есть величина, обратная удельной поверхности слоя т. е.  $l = \left| \frac{1}{\sigma} \right|$ .

Основным вопросом, решение которого имеет непосредственное практическое значение при каталитическом поверхностном горении, является вопрос о тепловой напряженности горения  $\left( \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3\text{час}} \text{ или } \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}} \right)$  и зависимость ее от каталитического влияния материала очага горения, удельной поверхности и скорости вдувания горючей смеси.

В соответствии с этим целесообразно вести экспериментальное исследование с помощью приближенного огневого моделирования и обрабатывать результаты в форме связи по уравнению подобия

$$K_{XI} = f(Bo', Re, Eu).$$

Искомая величина тепловой напряженности горения непосредственно связана с пирометрическим коэффициентом горения.

#### IV. Заключение

1. На основании анализа литературного материала других исследователей, а также в развитие собственных работ автора описана система уравнений, характеризующих физико-химический процесс горения газов в стационарных условиях.

2. Выявлены критерии, вытекающие из основных уравнений горения газов. Обсуждение конкретных условий развития стационарных процессов горения газов дало возможность сократить большое число критериев до значительно меньшего, без ущерба полноты отражения основных свойств рассматриваемых явлений.

3. Составлены критериальные уравнения для таких форм горения газов, как: а) ламинарно-диффузионное горение и б) поверхностное каталитическое (беспламенное) горение.

Эти критериальные уравнения являются основным содержанием предлагаемой гипотезы о приближенном огневом моделировании стационарных процессов горения газов.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Кирпичев и М. А. Михеев. Моделирование тепловых устройств, изд. АН СССР. 1936 .
2. Г. А. Дьяконов. ДАН СССР. Новая серия XXXIX, 4. 1943 г. и Изв. ОТН АН СССР, 7—8, 1944.
3. Дамкеллер. Успехи химии VII, 5, 1938.
4. Г. П. Иванцов. Сборник работ Стальпроекта „Вопросы движения газов в печах“, под редакцией Г. П. Иванцова. 1936.
5. А. М. Петунин, С. Н. Сыркин. Советское котлотурбостроение, 8. 1937.
6. Ауфгейзер. Топливо и его горение, 1933.
7. Цитировано по сборнику переводных статей „Проблемы турбулентности“, 1936.