МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

М.С. Демченко, А.Н. Токарева

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Учебное пособие

Зерноград – 2025

© М.С. Демченко, А.Н. Токарева, 2025

© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Об издании – 1, 2
Содержание

УДК 621.1.01.

Издается по решению методического совета энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент ***Гуриненко Л.А.***

доктор технических наук, доцент ***Липкович И.Э.***

Демченко М.С. Физико-химические основы процессов горения. [Электронный ресурс]: Учебное пособие/ М.С. Демченко, А.Н. Токарева. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025. – 88 с. - Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

В пособии приведены краткие теоретические сведения о видах, составе и характеристиках топлива, физической и химической сущности процессов, протекающих при горении топлива, рассмотрены примеры решения практических задач и предложены контрольные задания.

Учебное пособие предназначено для выполнения практических заданий по дисциплине «Физика горения», а также для выполнения специальных разделов выпускной квалификационной работы для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения материалов по дисциплине «Котельные установки и парогенераторы», «Технологические энергоносители» для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры электроэнергетики и теплотехники
Протокол № 5 от 26.12.2024г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией энергетической факультета
Протокол № 3 от 25.02.2025г.

© Демченко М.С., Токарева А.Н., 2025
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Содержание

1	Определение состава и количества продуктов сгорания топлива и его температуры……..		4
	1.1.	Элементарный состав твердых и жидких топлив…….	5
	1.2.	Теплотехническая оценка элементов, входящих в топливо…	6
	1.3.	Летучие вещества и кокс……..	8
	1.4.	Элементарный состав газообразных топлив…….	11
	1.5.	Разновидности топлива…….	13
	1.6.	Примеры решения задач по теме «Определение состава и количества продуктов сгорания топлива и его температуры»	16
2	Горение углерода……..		23
	2.1.	Физика и химия горения углерода……..	23
	2.2.	Примеры решения задач по теме «Горение топлива»……	31
3	Аэродинамика процессов горения…….		36
	3.1.	Аэродинамика процессов горения. Расчет развития струй…	36
	3.2.	Примеры решения задач по теме «Аэродинамика процессов горения»……	44
4	Сжигание жидкого топлива…….		51
	4.1.	Особенности горения жидкостей…….	51
	4.2.	Примеры решения задач по теме «Сжигание жидкого топлива»……..	55
5	Диффузия и массообмен при горении……		65
	5.1.	Особенности диффузии и массообмена при горении……	65
	5.2.	Примеры решения задач по теме «Диффузия и массообмен при горении»……	70
6	Распространение пламени в газовых смесях…….		76
	6.1	Нормальное распространение пламени в газовых смесях…….	76
	6.2	Примеры решения задач по теме «Распространение пламени в газовых смесях»……..	81
	Рекомендуемая литература……..		86

1. Определение состава и количества продуктов сгорания топлива и его температуры

Свойства топлива зависят в основном от его химического состава. Основным элементом любого топлива природного происхождения является углерод (его содержание составляет от 30% до 85% массы). В состав топлива также входят H, O, N, S, зола, влага.

Практическая ценность топлива определяется количеством теплоты, выделяющейся при его полном сгорании. Так, при сжигании 1 кг древесины выделяется теплота, равная 10,2 МДж, каменного угля - 22 МДж, бензина - 44 МДж. Эта величина прямо зависит от содержания в топливе углерода и водорода и обратно - от содержания кислорода и азота.

Еще одна важная характеристика топлива – это его жаропроизводительность, которая оценивается значением максимальной температуры, какую теоретически можно получить при полном сгорании топлива в воздухе. При сгорании дров, например, максимальная температура не превышает 1600 ^{0}C, каменного угля – 2050 ^{0}C, бензина – 2100 ^{0}C.

Для сопоставления запасов различных видов топлива и уровня его использования применяют так называемое условное топливо, удельная теплота сгорания которого равна 7000 ккал/кг (29,3 МДж/кг).

По сути, все добываемое топливо сжигается, лишь около 10% нефти и газа перерабатываются химической промышленностью. Наибольшее количество топлива расходуется на тепловых электростанциях (ТЭС), в различного рода, тепловых двигателях, на технологические нужды (например, при выплавке металла, для нагрева заготовок в кузнечных и прокатных цехах), а также на отопление жилых, общественных и производственных помещений.

Основной недостаток природного топлива - его крайне медленная восполняемость. Существующие ныне запасы были образованы десятки и сотни миллионов лет назад. В то же время добыча топлива непрерывно

увеличивается, что в будущем может привести к серьезному глобальному энергетическому кризису.

Все процессы добычи, переработки и транспортировки топлива охватывает топливная промышленность, которая является составной частью топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

1.1 Элементарный состав твердых и жидких топлив

Элементарный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода C, водорода H, кислорода O, серы S, азота N, золы A и влаги W (в процентах). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому числу присваивается соответствующий надстрочный индекс:

Горючая масса:

$$C^r + H^r + O^r + S^r + N^r = 100\%;$$

Сухая:

$$C^c + H^c + O^c + S^c + N^c + A^c = 100\%;$$

Рабочая:

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100\%.$$

Пересчет элементарного состава топлива с одной массы на другую проводится согласно формулам табл. 1.1.

Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности (зольности) на другую проводится по формуле:

$$X^p_1 = x^p \cdot (100 - W^p_1) / (100 - W^p);$$
$$X^p_1 = x^p \cdot (100 - A^p_1) / (100 - A^p). \qquad (1.1)$$

Таблица 1.1 - Коэффициенты пересчета масс топлива

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую делается пересчет		
	Горючая	Сухая	рабочая
Горючая	1	$\frac{100\% - A^c}{100\%}$	$\frac{100\% - (W^p + A^p)}{100\%}$
Сухая	$\frac{100\%}{100\% - A^c}$	1	$\frac{100\% - W^p}{100\%}$
Рабочая	$\frac{100\%}{100\% - (W^p + A^p)}$	$\frac{100\%}{100\% - W^p}$	1

1.2. Теплотехническая оценка элементов, входящих в топливо

Углерод является основным горючий элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 50-65%, в бурых углях 67-72%, каменных углях 76-90% и в антрацитах 92-94%, т.е. с увеличением геологического возраста твердого топлива содержание в нем углерода повышается. Состав жидких нефтяных топлив является достаточно стабильным и содержание в них углерода на горючую массу колеблется в узких пределах 86-87%.

Углерод характеризуется высокий удельным тепловыделением. При полном сгорании 1 кг углерода выделяется 33600 кДж теплоты. Следовательно, углерод по существу определяет тепловую ценность топлива.

Водород является вторым важнейшим горючим элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 6,0-6,5 %, в бурых углях около 5,0 %, в каменных углях 4,0-5,5 % и антрацитах 1,5-2,5 %. В жидких нефтяных топливах содержание водорода значительно выше и на горючую массу составляет 10-12 %. Тепловая ценность водорода почти в четыре раза выше тепловой ценности углерода. При полном сгорании 1 кг водорода и конденсации продуктов сгорания выделяется 141500 кДж тепла, без учета конденсации водяных паров 119000 кДж.

Сера, является третьим, весьма нежелательным, горючим элементом топлива. В общем случае сера топлива состоит из серы органической (So), входящей в топливо в виде органических соединений, серы колчеданной (Sк), входящей в состав топлива в виде колчедана (FeS_2), и серы сульфатной (Sc), входящей в топливо в виде, например, гипса ($CaS0_4$). Сера органическая и колчеданная образуют серу горючую (летучую) Sa = So + Sк. Сульфатная же сера не горит, и в элементарном составе топлива включается в золу. Содержание серы в топливах колеблется от 0 до нескольких %. При полном сгорании 1 кг серы летучей выделяется 9000 кДж тепла.

При горении серосодержащего топлива в промышленных топливосжигающих устройствах (печах, котлах, газотурбинных установках и др.) наряду с сернистым газом (SO_2) образуется незначительное количество серного ангидрида (SO_3). Наличие последнего в газообразных продуктах сгорания при определённых условиях вызывает сернокислотную, т.е. низкотемпературную, коррозию металла оборудования.

Кроме того, продукты сгорания серы вызывают загрязнение атмосферы. Поэтому сера является вредной примесью, снижающей теплотехническую цепкость топлива.

Кислород и азот являются нежелательными элементами топлива. Наличие их в топлива снижает содержание горючих элементов. Кислород, кроме того, связывает часть горючих элементов топлива, обесценивает его. Азот в топлива способствует образованию в газообразных продуктах сгорания окислов азота, обладающих высокой токсичностью, значительно превышающей токсичность окислов серы.

Кислород и азот принято называть внутренним балластом топлива. В жидких нефтяных топливах содержание кислорода и азота незначительно и в сумме (O+N) составляет 0,50-1,75%. В твердых топливах содержание кислорода и азота может быть значительно больше.

Зола представляет собой смесь различных минеральных веществ, которые остаются после полного сгорания горючей часта топлива.

Содержание золы обычно дается на сухую массу. Зольность жидких топлив нормируется ГОСТами и по своему значению невелика. Например, для дизельного топлива не более 0,02%, для топочных мазутов не более 0,30%. В твердых топливах содержание золы может достать значительных величин (до 30% и более на сухую массу). Зола является внешним балластом топлива. Она, снижает содержание горючей части топлива, вызывает дополнительные затрата на его добычу и транспорт. Она может вызывать эрозивный износ элементов оборудования. Содержание ванадия в золе жидких нефтяных топлив может при определенных температурах условиях привести к так называемой ванадиевой высокотемпературной коррозии металла.

Наличие солей натрия, окислов железа в золе жидких нефтяных топлив оказывает каталитическое действие на протекание сернокислой низкотемпературной коррозия металла.

Влага относится к внешнему балласту топлива. Наличие её (так же, как кислорода и азота) уменьшает содержание горючей части топлива. Это снижает тепловую ценность топлива, а также увеличивает расходы на его транспорт. Влага, кроме того, снижет полезное тепловыделение топлива, поскольку часть тепла при горении расходуется на превращение её в пар. Это ведёт также к понижению температурного уровня в зоне горения и ухудшает условия теплообмена.

1.3. Летучие вещества и кокс.

Другими важным теплотехническими характеристиками топлива являются выход летучих горючих веществ и твердый нелетучий остаток - кокс. Содержание летучих горючих веществ определяется путем нагревания навески топлива без доступа воздуха до температуры порядка 850°С. Потеря в весе навески за вычетом содержания влаги дает выход летучих веществ. В состав летучих входят водород H_2, углеводороды C_mH_n, окись углерода CO, двуокись углерода CO_2, некоторые другие соединения.

Выход летучих принято относить к горючей массе топлива. Чем геологически моложе топливо, тем меньше его степень углефикации (насыщение углеродом), тем больше выход летучих веществ. Так, горючая масса у дров » 85%, у бурого угля » 60%, а у антрацитов » 4%. Выход летучих горючих веществ характеризует способность топлива к воспламенению. Чем больше выход летучих и чем ниже температура их выделения, тем легче топливо воспламеняется и тем выше его реакционная способность при горении. Это свойство топлива учитывается при организации его сжигания.

Твёрдый осадок после отгонки летучих – кокс может быть сыпучим - неспекающимся, слабоспекающимся и спекающимся. Свойства кокса, естественно, в значительной мере влияют на организацию сжигания топлива, а также на использования топлива для его коксования, газификации и т.д.

При сжигании твёрдых топлив большое значение имеет также температура плавления золы.

Расчеты горения топлива обычно выполняют с целью определения:

1) количества необходимого для горения воздуха (окислителя);
2) количества и состава продуктов сгорания;
3) температура горения.

При отсутствии табличных данных теплоту сгорания топлив необходимо определять в калориметрических бомбах. Для ориентировочных расчетов низшая теплота сгорания твердых или жидких топлив может быть рассчитана по формуле Д.И.Менделеева (в ккал/ кг)

$$Q^p_н = 81C^p + 246H^p – 26 (O^p – S^p) – 6W^p \qquad (1.2)$$

или (в кДж/ кг)

$$Q^p_н = 339C^p + 1025H^p – 108,5 (O^p – S^p) – 25W^p. \qquad (1.3)$$

Минимальное (теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива), находится по формуле (в $м^3$/ кг)

$$V^0 = 0{,}0889C^p + 0{,}265H^p - 0{,}0333\ (O^p - S^p). \quad (1.4)$$

Действительное количество воздуха определяется произведением коэффициента избытка воздуха α и теоретического количества воздуха (в $м^3/кг$)

$$V_д = \alpha V^0. \quad (1.5)$$

Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 кг топлива в теоретически необходимом количестве воздуха, равен (в $м^3$/ кг)

$$V^0_r = V_{RO2} + V^0_{N2} + V^0_{H2O} \quad (1.6)$$

Где объемы продуктов сгорания каждого компонента будут

$$V_{RO2} = 0{,}01866\ (C^p + 0{,}375S^p); \quad (1.7)$$

$$V^0_{N2} = 0{,}79V^0 + 0{,}008N^p; \quad (1.8)$$

$$V^0_{H2O} = 0{,}111H^p + 0{,}0124W^p + 0{,}0161V^0. \quad (1.9)$$

Объем продуктов сгорания при сжигании 1 кг топлива в действительном количестве воздуха определяется по формуле (в $м^3$/ кг)

$$V_r = V^0_r + 1{,}0161\ (\alpha - 1)V^0. \quad (1.10)$$

Энтальпия продуктов сгорания Ir определяется суммой произведений объема элементарных продуктов сгорания, их удельной теплоемкости с и температуры ύ

$$I_r = \sum_{i=1}^{k} V_i c_i ύ + a_{ун}\, A^p c_{зл} ύ / 100,$$

где $a_{ун}$ – доля золы, уносимой газами;

$c_{зл}$ – удельная теплоемкость золы, кДж/ (кг·К).

Теплосодержание золы $I_{зл}$ учитывается при

$$a_{ун}A^p / Q^p_н > 1{,}43\%\ кг/МДж.$$

1.4. Элементарный состав газообразных топлив

Элементарный состав газообразных топлив обычно приводится как процентное содержание отдельных газов: окиси углерода CO, водорода H_2, метана CH_4, этана C_2H_6, кислорода O_2, азота N_2 и т.д.

Теплота сгорания газообразных топлив подсчитывается (в МДж/ м^3) как сумма произведений теплоты сгорания отдельных компонентов и их содержания в 1 м^3 газообразного топлива:

$$Q^c_н = 0{,}126CO + 0{,}358CH_4 + 0{,}58C_2H_2 + 0{,}108H_2 + \ldots \quad (1.11)$$

Минимальный (теоретический) объем воздуха, необходимый для сжигания 1м^3 газообразного топлива, определяется (в м^3/ м^3) как

$$V_0 = 0{,}0476\,[0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 1{,}5H_2S + \sum(m + n/4)C_mH_n - O_2]. \quad (1.12)$$

Теоретический объем азота

$$V^0_{N2} = 0{,}79V^0 + 0{,}01N_2. \quad (1.13)$$

Объем трехатомных газов

$$V_{RO2} = 0{,}01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n). \quad (1.14)$$

Теоретический объем водяных паров

$$V^0_{H2O} = 0{,}01 \cdot (H_2S + H_2 + \sum n/2 \cdot C_mH_n + 0{,}0124d) + 0{,}0161V^0. \quad (1.15)$$

Действительный объем продуктов сгорания при $\alpha > 1$ (в м^3/ м^3)

$$V_г = V^0_{N2} + V_{RO2} + V^0_{H2O} + (\alpha - 1)\,V^0. \quad (1.16)$$

При сжигании сланцев объемы продуктов сгорания вычисляются с поправкой на разложение карбонатов k.

Расчетное содержание золы (в процентах) с учетом разложившихся карбонатов

$$A^p_к = A^p + (1 - k)\,(CO_2)^p_к. \quad (1.17)$$

Объем углекислоты (в м^3/ кг)

$$V_{RO2к} = V_{RO2} + 0{,}00509k\,(CO_2)^p_к. \quad (1.18)$$

Объем газов (в м3/ кг)

$$V_{г.к} = V_г + 0{,}00509k\,(CO_2)^p_к. \quad (1.19)$$

При сжигании смеси топлив объемы и энтальпии продуктов сгорания рекомендуется рассчитывать для каждого топлива в отдельности на 1 кг твердого или жидкого и на 1 м3 газообразного топлива.

По полученным для каждого топлива значениям V^0, V_{RO2}, V_{N2} определяются (в $м^3$/ кг) объемы воздуха и продуктов сгорания смеси. Для смеси двух однородных топлив (твердых, жидких или газообразных)

$$V^0 = g'V^{0'} + (1 - g')V^{0''}, \quad (1.20)$$

где g′ - массовая доля первого топлива в смеси.

По аналогичным формулам определяются V_{RO2}, V^0_{N2}, V^0_{H2O} смеси.

Расчет ведется на 1 кг твердого или жидкого топлива. Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным предварительно определяется количество газа x, приходящееся на 1 кг топлива.

Объем воздуха (в $м^3$/ кг)

$$V^0 = V^{0'} + xV^{0''}. \quad (1.21)$$

Аналогично рассчитываются объемы углекислоты, азота, водяных паров.

Удельная теплоемкость продуктов сгорания (средняя) определяется по формуле [в кДж/ ($м^3$·К)]

$$C_г = 0{,}01\ (c_{CO2}CO_{2,\%} + \ldots). \quad (1.22)$$

Теоретическая температура горения вычисляется по формуле

$$ϑ_a = (Q^p_н + V_в c_в t_в)/ \sum (V_г c_г). \quad (1.23)$$

Для точных подсчетов необходимо составить I–ϑ таблицу, при ориентировочных принимать средние значения удельной теплоемкости.

Коэффициент избытка воздуха по данным газового анализа продуктов сгорания определяется по следующим формулам:

при полном сгорании топлива (в продуктах сгорания отсутствуют продукты неполного горения)

$$\alpha = 21/ (21 - O_{2,\%}); \quad (1.24)$$

при содержании в продуктах сгорания горючих компонентов сначала определяется (в процентах) избыточное содержание кислорода

$$O_{2\ изб\ \%} = O_{2,\ \%} - 0{,}5CO_{\%} - 0{,}5H_{2,\%} - 2CH_{4,\%}, \qquad (1.25)$$

а затем по формуле

$$\alpha = 21/\cdot\ (21 - O_{2\ изб\ \%}) \qquad (1.26)$$

определяется коэффициент избытка воздуха.

1.5 Разновидности топлива

Торф представляет собой остатки перегнивших растительных веществ. По способу добычи различают торф резной, кусковой, прессованный (в виде брикетов) и фрезерный (в виде торфяной крошки). По своему химическому составу торф приближается к дровам, но зольность его гораздо выше. Он может служить источником получения энергии и тем самым обеспечивать экономию котельно-печного топлива в сельскохозяйственном производстве и в быту сельского населения. Характеристики процесса горения торфа, как топлива аналогичны характеристикам горения соломы. Содержание золы после сгорания торфа довольно значительно и составляет 2-10% в зависимости от качества торфа. Однако, КПД торфа, как топлива может оказаться на 3-8% выше, чем КПД древесного топлива. После заготовки пластового торфа содержание влаги составляет в нем приблизительно 40-50%, а после одного года хранения содержание влаги в торфе составляет не более 30%. Были испытаны специальные печи, работающие на торфе, КПД которых при аккумулятивном отоплении составлял 70-76%, а при прямом отоплении - 80-85%.

Топочные мазуты марок 40 и 100 изготовляют из остатков переработки нефти. В мазут марки 40 для снижения температуры застывания до 10 °С добавляют 8-15% среднедистиллятных фракций, в мазут марки 100 дизельные фракции не добавляют.

Флотские мазуты марок Ф-5 и Ф-12 предназначены для сжигания в судовых энергетических установках. По сравнению с топочными мазутами марок 40 и 100 они обладают лучшими характеристиками: меньшими

вязкостью, содержанием механических примесей и воды, зольностью и более низкой температурой застывания. Флотский мазут марки Ф-5 получают смешением продуктов прямой перегонки нефти: в большинстве случаев 60-70% мазута прямогонного и 30-40% дизельного топлива с добавлением депрессорной присадки. Допускается использовать в его составе до 22% керосиногазойлевых фракций вторичных процессов, в том числе легкого газойля каталитического и термического крекинга. Флотский мазут марки Ф-12 вырабатывают в небольших количествах на установках прямой перегонки нефти. Основными отличиями мазута Ф-12 от Ф-5 являются более жесткие требования по содержанию серы (0,6% против 2,0%) и менее жесткие требования по вязкости при 50 °С.

Дрова – самый распространенный вид твердого топлива, имеют наибольшее содержание летучих веществ. Использование того или иного вида дров зависит от наличия лесного массива. Теплотворная способность дров на единицу массы практически не зависит от вида древесины. Но на единицу объема дрова с более плотной древесиной дают значительно больше тепла. Лучшими дровами с точки зрения теплоотдачи являются лиственница и береза. Предпочтительнее использование березовых дров, так как после сгорания они выделяют много тепла и минимальное количество угарного газа. Дрова из лиственницы выделяют много тепла, они быстро нагревают массив печи и поэтому их расход гораздо меньше, чем березовых. Однако после сгорания такие дрова выделяют большое количество угарного газа. Большое количество тепла выделяется при сгорании дубовых и буковых дров, однако, при их отсутствии часто применяют хвойные, осиновые и другие виды древесины.

Угли ископаемые, твердое горючее полезное ископаемое; продукт преобразования высших и низших растений, содержащий до 50% минеральных примесей и влагу. Залегают обычно в виде пластов среди осадочных пород. Подразделяются на гумолиты (бурые, каменные угли и антрациты) и сапропелиты.

Гумолиты (гумусовые), группа ископаемых углей - продукт преобразования остатков высших растений в болотных условиях. Подразделяются на бурые, каменные угли и антрациты.

Бурый уголь, ископаемый уголь наиболее низкой степени углефикации - переходная форма от торфа к каменному углю. Плотность органической массы 1,2-1,5 г/см^3. Теплота сгорания горючей массы 22,6-31 МДж/кг (5400-7400 ккал/кг). Бурые угли делятся по влажности на технологические группы: Б1 (св. 40%), Б2 (30-40%) и Б3 (до 30%).

Каменный уголь, ископаемый уголь средней степени углефикации; содержит в горючей массе от 75 до 92% углерода, от 7 до 42% летучих веществ; теплота сгорания 30,5-36,8 МДж/кг. Подразделяется по выходу летучих веществ и спекаемости на марки: длиннопламенные (Д), газовые (Г), газово-жирные (ГЖ), жирные (Ж), коксо-жирные (КЖ), коксовые (К), отощенно-спекающиеся (ОС), тощие (Т), слабоспекающиеся (СС). Энергетическое топливо, сырье для получения жидкого топлива.

Антрацит, ископаемый уголь высшей стадии углефикации. Плотность 1500-1700 кг/м3; теплота сгорания 33,8-35,2 МДж/кг. Содержит (в горючей массе) до 9% летучих веществ, 93,5-97% углерода. Высококачественное энергетическое топливо. Используется также при производстве карбидов, электродов и др.

Сапропелиты, группа ископаемых углей - продукт преобразования остатков низших растений и простейших микроорганизмов, накопившихся в условиях озерных или лагунных фаций. Выход летучих веществ 60-90%, первичного дегтя св. 50%. Сырье для получения жидкого топлива.

В бурых углях количество влаги составляет 15-60%, в каменных - 4-15%. Не менее серьезное значение имеет содержание в угле минеральных примесей, или его зольность, которая колеблется в широких пределах - от 10 до 60%. Одним из главных показателей качества энергетических углей является низшая теплота сгорания рабочего топлива (для бурых углей 6-15 МДж/кг, для каменных (10-30 МДж/кг).

Таблица 1.2 - Теплотворная способность некоторых видов топлива

Вид топлива	Теплотворная способность твердого и жидкого топлива, ккал/кг (средние значения)
Дрова с влажностью: 25% 30% 50%	 3300 3000 2800
Торф кусковой (W=30%), Торф брикетный	3000 4000
Подмосковный уголь	3000
Бурый уголь	4700
Каменный уголь	500 - 7200
Антрацит	7000
Нефть	10000
Мазут	9000-9700
Солома, подсолнечная лузга, льняная костра, опилки	3500-3800

1.6. Примеры решения задач по теме « Определение состава и количества продуктов сгорания топлива и его температуры»

1.6.1. Определить количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1 кг следующего состава: C^p = 37,2%; H^p = 2,6%; S^p = 0,6%; N^p = 0,4%; O^p = 12%; W^p = 40%; A^p = 7,2%. Определить также объем продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха α = 1,2.

Решение:

Теоретически необходимое количество воздуха определим по формуле (1.4):

$$V^0 = 0{,}0889 \cdot 37{,}2 + 0{,}265 \cdot 2{,}6 - 0{,}033 \cdot (12{,}0 - 0{,}6) = 3{,}613 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов сгорания вычислим по формулам (1.7) – (1.10):

$$V_{RO2} = 0{,}01866 \cdot (37{,}2 + 0{,}375 \cdot 0{,}6) = 0{,}698 \text{ м}^3/\text{ кг};$$

$$V_{H2O} = 0{,}0124 \cdot (9 \cdot 2{,}6 + 40) + 0{,}0161 \cdot 3{,}613 = 0{,}844 \text{ м}^3/\text{ кг};$$

$$V^0_{N2} = 0{,}79 \cdot 3{,}613 + 0{,}008 \cdot 0{,}4 = 2{,}857 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_r = 0{,}698 + 0{,}844 + 2{,}857 + 1{,}0161 \cdot (1{,}2 - 1) \cdot 3{,}613 = 5{,}143 \text{ м}^3/\text{ кг}.$$

1.6.2. Определить состав рабочей массы топлива, если указан следующий состав: Cp = 38,6%; Hp = 2,6%; Sp = 3,8%; Np = 0,8%; Op = 3,1%;

Wp = 11,0%; Ap = 40,1%, а технический анализ показал, что действительная влажность составляет Wp1 = 16%. Какова при этом будет теплота сгорания?

Решение:

Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности на другую проводится по формуле (1,1)

$$X^p_1 = X^p \cdot ((100 - W^p_1)/ (100 - W^p));$$

$C^p_1 = 36,4\%$; $H^p_1 = 2,4\%$; $O^p_1 = 2,9\%$; $S^p_1 = 3,6\%$; $N^p_1 = 0,8\%$; $A^p_1 = 37\%$

Теплота сгорания по формуле Д.И. Менделеева составит

$$Q^p_{H1} = 339 \cdot C^p_1 + 1025 \cdot H^p_1 - 108,5 \cdot (O^p_1 - S^p_1) - 25W^p_1 = 14,5 \text{ МДж/ кг.}$$

1.6.3. Определить количество продуктов сгорания смеси топлив, состав которых известен:

1) 40 кг угля: $C^p = 47,4\%$; $H^p = 3,2\%$; $O^p = 9,7\%$; $S^p = 2,5\%$; $W^p = 11,0\%$; $N^p = 1,3\%$; $A^p = 24,9\%$.

2) 60 м^3 газообразного топлива: $CO = 25\%$; $H_2 = 14\%$; $C_mH_{n=0,3\%}$; $CH_4 = 2,2\%$; $CO_2 = 6,5\%$; $O_2 = 0,2\%$; $N_2 = 50,6\%$.

Решение:

1) Найдем теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг твердого топлива по формуле (1.4):

$V^0 = 0,0889 \cdot 47,4 + 0,265 \cdot 3,2 - 0,033 \cdot (9,7 - 2,5) = 4,83$ м^3/кг.

Объем продуктов сгорания вычислим по формулам (1.6) – (1.9):

$V_{RO2} = 0,01866 \cdot (47,4 + 0,375 \cdot 2,5) = 0,90$ м^3/ кг;

$V^0_{H2O} = 0,111 \cdot 3,2 + 0,0124 \cdot 11 + 0,0161 \cdot 4,83 = 0,58$ м^3/ кг;

$V^0_{N2} = 0,79 \cdot 4,83 + 0,008 \cdot 1,3 = 3,83$ м^3/кг;

$V^0_г = V_{RO2} + V^0_{N2} + V^0_{H2O} = 5,31$ м^3/кг, для 1 кг угля.

Для 40 кг угля $V^0_г = 212,4$ м^3.

2) Найдем теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3 газообразного топлива по формуле (1.12):

$$V^0 = 0,0476 \, (0,5 \cdot 25 + 0,5 \cdot 14 + 3 \cdot 2,2 + 0,3 - 0,2) = 1,25.$$

Теоретический объем азота (1.13):

$$V^0_{N2} = 0,79 \cdot 1,25 + 0,01 \cdot 50,6 = 1,49.$$

Объем трехатомных газов (1.13):

$$V_{RO2} = 0,01 \cdot (6,5 + 25 + 2,2 + 0,3) = 0,34. \quad (1.14)$$

Теоретический объем водяных паров:

$$V^0_{H2O} = 0,01 \cdot (14 + 4,4 + 0,3) + 0,0161 \cdot 1,25 = 0,21. \quad (1.15)$$

Теоретический объем продуктов сгорания:

$$V^0_г = V_{RO2} + V^0_{N2} + V^0_{H2O} = 2,04$$

Для 60 м^3 газообразного топлива $V^0_г = 122,4$ м^3

1.6.4 Определить теплоту сгорания, теоретический объем продуктов сгорания и количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1кг смеси:

1) 40% угля: $C^p = 62,1\%$; $H^p = 4,2\%$; $O^p = 6,4\%$; $S^p = 3,3\%$;

$W^p = 7\%$; $N^p = 1,2\%$; $A^p = 15,8\%$.

2) 60% угля: $C^p = 38,6\%$; $H^p = 2,6\%$; $O^p = 3,1\%$; $S^p = 3,8\%$;

$W^p = 11\%$; $N^p = 0,8\%$; $A^p = 40,1\%$.

Для смеси: $C^p = 48\%$; $H^p = 3,2\%$; $O^p = 4,4\%$; $S^p = 3,6\%$;

$W^p = 9,4\%$; $N^p = 1,0\%$; $A^p = 30,4\%$.

Решение:

Найдем теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг твердого топлива по формуле (1.4):

$V^0 = 0,4 \cdot (0,0889 \cdot 62,1 + 0,265 \cdot 4,2 - 0,033 \cdot (6,4 - 3,3)) + 0,6 \cdot (0,0889 \cdot 38,6 + 0,265 \cdot 2,6 + 0,033 \cdot 0,7) = 5,09$ м^3/ кг;

Объем продуктов сгорания вычислим по формулам (1.6) – (1.9):

$V_{RO2} = 0,01866 \cdot (48 + 0,375 \cdot 3,6) = 0,92$ м^3/ кг;

$V^0_{H2O} = 0,111 \cdot 3,2 + 0,0124 \cdot 9,4 + 0,0161 \cdot 5,09 = 0,56$ м^3/ кг;

$V^0_{N2} = 0,79 \cdot 5,09 + 0,008 \cdot 1,0 = 4,03$ м^3/кг;

$V^0_г = V_{RO2} + V^0_{N2} + V^0_{H2O} = 5,51$ м^3/кг.

Теплоту сгорания найдем по формуле Менделеева (1.2):

$Q^p_н = 81 \cdot 48 + 246 \cdot 3,2 - 26 \cdot (4,4 - 3,6) - 6 \cdot 9,4 = 4598$ ккал/кг.

1.6.5 Определить состав рабочей массы, если известно, что составляющие горючей массы топлива равны: $C^г$ = 85%; $H^г$ = 6%; $O^г$= 5%; $S^г$ = 4%; $W^р$ = 18,6%; $A^с$ = 30%. Найти теплоту сгорания и определить теоретическую температуру горения при $t_в$ =573 К и коэффициенте избытка кислорода α = 1,25. Теплоемкость продуктов горения $c_{г\ =}$ 1,436 кДж/($м^3$·К), теплоемкость воздуха $c_в$ = 1,34 кДж/($м^3$·К).

Решение:

Найдем коэффициент для перерасчета сухой массы в рабочую:

$$K^{ср} = (100\% - W^р)/100\% = 0{,}814.$$

Тогда $A^р = K^{ср} \cdot A^с$ = 24,4%.

Найдем коэффициент для перерасчета горючей массы в рабочую:

$$K^{гр} = (100\% - (W^р + A^р))/100\% = 0{,}57.$$

Тогда состав рабочей массы будет: $C^р$ = 48,5%; $H^р$ = 3,4%; $O^р$ = 2,9%; $S^р$ = 2,3%; $W^р$ = 18,6%; $A^р$ = 24,4%.

Определим теплоту сгорания топлива по формуле (1.3):

$Q^р_н = 339 \cdot 48{,}5 + 1025 \cdot 3{,}4 – 108{,}5 \cdot (2{,}9 – 2{,}3) – 25 \cdot 18{,}6 = 19396{,}4$ кДж/ кг.

Найдем действительный объем воздуха, необходимый для полного сгорания:

$V_в = \alpha \cdot V^0 = 1{,}25 \cdot (0{,}0889 \cdot 48{,}5 + 0{,}265 \cdot 3{,}4 – 0{,}0333 \cdot 0{,}6) = 6{,}49$ $м^3$/ кг.

Объем продуктов сгорания вычислим по формулам (1.6) – (1.9):

$V_{RO2} = 0{,}01866 \cdot (48{,}5 + 0{,}375 \cdot 2{,}3) = 0{,}92$ $м^3$/ кг;

$V^0_{H2O} = 0{,}111 \cdot 3{,}4 + 0{,}0124 \cdot 18{,}6 + 0{,}0161 \cdot 5{,}19 = 0{,}69$ $м^3$/ кг;

$V^0_{N2} = 0{,}79 \cdot 5{,}19 = 4{,}10$ $м^3$/кг;

$V^0_г = V_{RO2} + V^0_{N2} + V^0_{H2O\ =}$ 5,71 $м^3$/кг;

Действительный объем продуктов сгорания определим по формуле (1.10):

$V_г = V^0_г + 1{,}0161 \cdot 0{,}25 \cdot V^0 = 5{,}71 + 1{,}0161 \cdot 0{,}25 \cdot 5{,}19 = 7{,}03$ $м^3$/кг;

Вычислим теоретическую температуру горения по формуле (1.23):

$$ύ_a = (Q^р_н + V_в c_в t_в)/ \sum (V_г c_г).$$

$$\acute{\upsilon}_a = (19396,4 + 6,49 \cdot 1,34 \cdot 573)/ (7,03 \cdot 1,436) = 2415 \text{ K}.$$

1.6.6 Определить теплоту сгорания смеси газов, вычислить объемы продуктов сгорания и теоретическую температуру горения при tв=270 ºС и α=0,5. Смесь состоит из 60% природного газа состава: CO_2 =0,1%; CH_4 =98%; C_2H_6=0,4%; C_3H_8=0,2%; N_2=1,3% и 40% газа коксовых печей состава: H_2S=0,4%; CO=6,8%; CO_2=2,3%; H_2=22,3%; C_2H_6=0,8%; C_mH_n=1,9%; O_2= 0,8%; N_2=7,7%; $C_Г$=1,43 кДж/К·м^3.

Решение:

Низшая теплота сгорания определится по формуле:

$$Q_н^p = 30,2CO+25,7H_2+56H_2S+85,5CH_4+138,4C_2H_2+152C_2H_6 + +216C_3H_8+1651C_mH_n$$

$Q_{н1}^p$=85,5·98+152·0,4+216·0,2=8483 ккал/кг=35,6 МДж.

$Q_{н2}^p$=30,2·68+25,7·22,3+152·0,8+1651·1,9=3136,9 ккал/кг=13,7 МДж.

$Q_н^p$=0,6· $Q_{н1}^p$+0,4· $Q_{н2}^p$=0,6·36,5+0,4·13,7=28,2.

Объемы продуктов сгорания можно определить по формулам:

$V_г=V_г^o+(\alpha-1)\cdot V^0$;

$V^0=0,0476\cdot (0,5CO+0,5H_2+1,5H_2S+\sum(m+n/4)C_mH_n-O_2)$;

$V_г^o=V_{RO2}^0+V_{N2}^0+V_{H2O}^0$;

$V_{RO2}^0=0,1\ (CO_2+CO+H_2S+\sum m\cdot C_mH_n)$;

$V_{N2}^0=0,79\ V^0+0,01N_2$;

$V_{H2O}^0=0,01\ (H_2S+ H_2+\sum(n/2)\cdot C_mH_n)+0,016\ V^0$.

$V_г$=10,2 м^3/м^3.

Теоретическую температуру горения при tв=270 ºС и α=0,5 определим по формуле:

$\Theta_Т= (Q_н^p- V^0\cdot C_В\cdot T_В)\cdot V_г\cdot C_г$; $\Theta_Т$= 1968К.

1.6.7 Из результатов химического анализа продуктов сгорания получены следующие данные: O_2=5%; CO=1%; H_2=2%; CH_4=1,75%. Определить коэффициент избытка воздуха α.

Решение:

Коэффициент избытка воздуха по данным газового анализа продуктов сгорания определяется по формулам 1.25-1.26.

избыточное содержание кислорода составит

$$O_{2\ изб\ \%} = 5\% - 0{,}5 \cdot 2\% - 0{,}5 \cdot 1\% - 2 \cdot 1{,}75\% = 0,$$

тогда коэффициент избытка воздуха $\alpha = 21/(21 - 0) = 1$

Контрольные задачи по теме « Определение состава и количества продуктов сгорания топлива и его температуры»

1.6.8 Определить теоретический объем воздуха, необходимого для горения 1 $м^3$ метана, этана, пропана, бутана и пентана. Построить график зависимости объема воздуха от положения вещества в гомологическом ряду (содержания углерода в молекуле вещества).

1.6.9 Определить теоретическую массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг метана, метилового спирта, муравьиного альдегида, муравьиной кислоты. Объяснить причину влияния состава вещества на объем воздуха, требуемого для их горения.

1.6.10 Определить объем и массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг древесины, состава: С – 47 %, Н – 8 %, О – 40 %, W – 5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,8; давление 900 ГПа, температура 285 К.

1.6.11 Сколько воздуха, кг, поступило на горение 1 кг углерода, если в продуктах горения содержание кислорода составило 17 %?

1.6.12 Сколько воздуха, кг, требуется подать на сжигание 200 $м^3$ генераторного газа состава: CO – 29 %, H_2 – 14 %, CH_4 – 3 %, CO_2 – 6,5 %, N_2 - 45 %, O_2 - 2,5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,5?

1.6.13 Определить количество сгоревшего толуола, кг, в помещении объемом 400 $м^3$, если после пожара при отсутствии газообмена установлено, что содержание кислорода снизилось до 17 %.

1.6.14 Определить избыток воздуха в продуктах горения газовой смеси состава: CO – 15 %, C_4H_{10} – 45 % O_2 – 30 %, N_2 –10 %, если коэффициент избытка воздуха равен 1,9.

1.6.15 Сколько окислительной среды, $м^3$, состоящей из 50 % кислорода и 50 % азота, необходимо для горения 8 кг этилацетата, если коэффициент избытка равен 1,2; температура 265 К, давление 850 ГПа.

1.6.16 Сколько антрацита (принять, что содержание углерода равно 100 %) сгорело в помещении объемом 150 м3, если горение прекратилось при снижении кислорода до 13 %. Газообмен не учитывать.

1.6.17 Рассчитать массовый и объемный расход воздуха, необходимый для горения газового фонтана дебитом 30 млн. $м^3$/сут, состоящего из CH_4– 80 %, CO_2 – 10 %, H_2S – 5 %, O_2 – 5 %, при температуре воздуха 27 ^oC и давлении 105 кПа.

1.6.18 Определить объем и состав, % (об.), продуктов горения 1 $м^3$ этилена, пропилена, бутилена, если температура горения 1800 К, давление 98 000 Па. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания отдельных компонентов от молекулярной массы горючего.

1.6.19 Определить объем продуктов горения и содержание паров воды и кислорода при горении 1 кг гексана, гептана, октана, декана, если температура горения 1300 К, давление 10 1325 ГПа, коэффициент избытка воздуха при горении 1,8. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания кислорода от молекулярной массы горючего.

1.6.20 Определить объем и состав продуктов горения 10 кг древесины со- става С – 49 %, Н – 6 %, О – 44 %, N – 1 %, если температура горения1250 К, коэффициент избытка воздуха 1,6.

1.6.21 Сколько продуктов горения, приведенных к нормальным условиям, образуется в результате сгорания 25 $м^3$ газовой смеси состава

H_2 – 45 %, C_4H_{10} – 20 %, CO – 5 %, NH_3 – 15 %, O_2 – 15 %, если горение протекало при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,2?

2. Горение углерода

2.1. Физика и химия горения углерода

Твердое натуральное топливо содержащие углерод, влагу, золу и большое количество различных углеводородных соединений, при попадании в топочную камеру и нагревании выделяет в окружающий объем влагу и летучие. В результате выделения этих составляющих остается твердый осадок – кокс, содержащий углерод и золу.

Выделение и горение летучих оказывает большое влияние на протекание горения твердого топлива, определяя условия для воспламенения и выгорания коксового остатка. Однако выгорание летучих – это быстротекущий процесс, и можно считать, что выгорание летучих занимает не более 10% общего времени выгорания частицы.

Таким образом, выгорания содержащего в коксе углерода занимает 90% общего времени выгорания частицы твердого топлива. Зола коксового остатка не оказывает существенного влияния на выгорание углерода коксового остатка. (За исключением горения многозольных топлив)

Будем считать, что при высокотемпературном горении углерода имеет место протекание следующих итоговых реакций на внешней поверхности куска и на поверхности пор.

При сухой газификации (отсутствие паров H_2O)

$C + O_2 = CO_2 + q_1$

$2C + O_2 = 2CO + q_2$

$C + CO_2 = 2CO + q_3$

При мокрой газификации (окисление за чет H_2O)

3’. $C + H_2O = CO + H_2 + q_3$’

3”. $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 + q_3$”

3”’.$C + 2H_2 = CH_4 + q_3$”’

В условиях встречной диффузии продуктов неполного горения от поверхности углерода в поток окислителя, диффундирующего на встречу из объема между ними неизбежно взаимодействие в близи углеродной поверхности согласно реакциям:

При сухой газификации

4. $2CO + O_2 = 2CO_2 + q_4$

При мокрой газификации

4.’ $2H_2 + O_2 = 2H_2O + q_4$,

4.”$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + q_4$”

4.”’$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + q_4$”’

Рассматривая высокотемпературные горения, мы можем принять существенное упрощенное выражения для скорости реакций, исходя из первого порядка реакций по компоненту, находящемуся в недостатке. Для температурного изменения констант скорости реакций примем закономерность Аррениуса. Количество реагирующего вещества в каждой реакции будет:

$$dG_i = G_i k_{0i} e^{\frac{\tau}{kT}} d\tau \qquad (2.1)$$

Введение условной точки – полюса, в которую сходятся все линии констант скоростей реакций, позволяет связать энергию активации с предэкспоненциальным множителем в законе Аррениуса. В том случае связь между k_{0i} и E_i описывается равенством:

$$Lg\ k_{0i} = 0.2 \cdot 10^{-4} E_i + 2 \qquad (2.2)$$

На основании анализа многочисленных опытных данных можно принять следующие соотношения между энергиями активаций различных реакций:

$$\left.\begin{array}{l} E_{C+O} \rightarrow CO / E_{C+O} \rightarrow CO_2 = 1{,}1 \\ E_{C+CO} / E_{C+O} \rightarrow CO_2 = 2{,}2 \\ E_{C+HO} / E_{C+O} \rightarrow CO_2 = 1{,}6 \end{array}\right\} \qquad (2.3)$$

Энергия активации для реакции $C+O_2=CO_2$ у коксов твердого топлива разных видов имеет следующие средние значения (в МДж/кмоль):

Древесный уголь – 75 – 84;

Торф – 84;

Бурый уголь – 92 -105;

Каменный уголь – 117 – 134;

Тощий уголь и антрацит - 140 – 146;

Электродный уголь – 167;

Процессы, происходящие в пограничном слое вблизи горящей поверхности, наиболее просто учитывать методом приведенной пленки. Размер приведенной пограничной пленки определяется условием $\Delta = \delta/Nu_D$ – для плоской частицы $\Delta = \delta/(Nu_D - 2)$ - для шаровой. В этих выражениях коэффициент диффузии рассчитывается при условиях; исключающих молярный перенос.

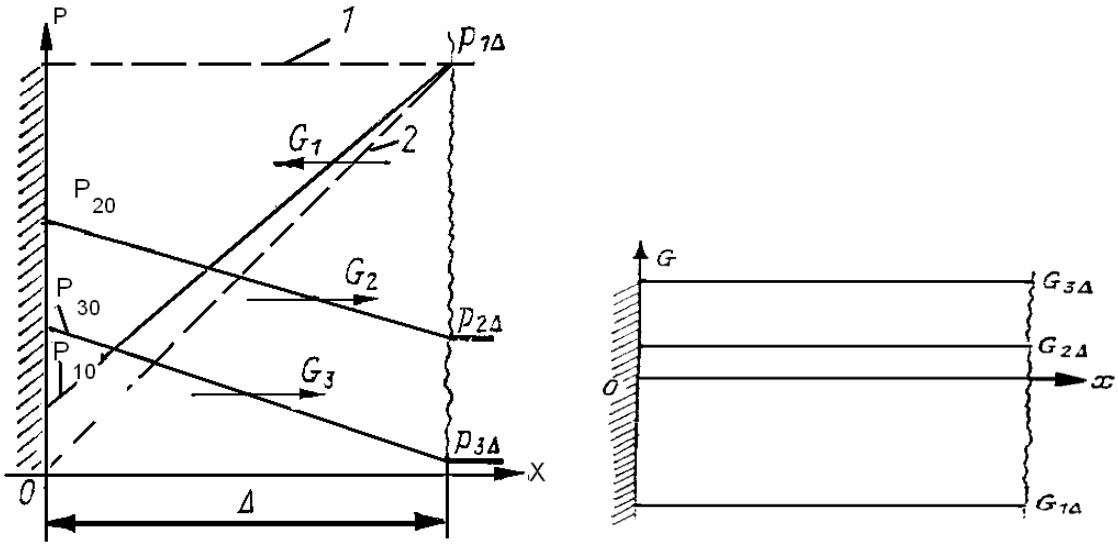
В пределах приведенной пленки протекает реакция горения окиси углерода, которая сгорает частично или полностью в зависимости от условий. Скорость данной гомогенной реакции определяется первым порядком по компоненту, находящемуся в недостатке. Для оценки влияния этой реакции на ход выгорания коксовой частицы введем критерий Семенова

$$S_e = \sqrt{k_4 \Delta^2 / D} = \sqrt{k_4 D/\alpha_D} \qquad (2.4)$$

где - k_4 константа скорости четвертой реакции.

Если Se < 0,4, то выгорание протекает по схеме негорящего пограничного слоя. При $0.4 \le Se \le 2$ имеет место одинарный горящий пограничный слой, а когда выполняется неравенство $1/Se + 1/2N_3 \le 0.5$, начинается переход к двойному горящему слою.

Для негорящего пограничного слоя без учета изменения объема реагирующих веществ будем иметь (рис.2.1):



1.В кинетической области; 2. В диффузионной области

Рис.2.1 Распределение парциальных давлений и измерение компонентов у поверхности, горящей углеродной частицы в негодящем горячем слое.

$$p_{10} = \frac{p_{1\Delta}}{1+N_1+N_2}; \tag{2.5}$$

$$p_{20} = \frac{1}{1+N_3}\left(\frac{N_1 \cdot p_{1\Delta}}{1+N_1+N_2} + p_{2\Delta}\right); \tag{2.6}$$

$$p_{30} = \frac{1}{1+N_3}\left[\frac{p_{1\Delta}(N_2+N_3(N_1+N_2))}{1+N_1+N_2} + p_{2\Delta}N_3 + p_{3\Delta}(1+N_3)\right]; \tag{2.7}$$

$$G_1 = -\left[\frac{\alpha_D p_{1\Delta}(N_1+N_2)}{RT(1+N_1+N_2)}\right]; \tag{2.8}$$

$$G_2 = -\left[\frac{\alpha_D}{RT(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot\left[-N_1 \cdot p_{1\Delta} + p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2)\right]; \tag{2.9}$$

$$G_3 = -\left[\frac{2\alpha_D}{RT(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot\left[p_{1\Delta}(N_2+N_3(N_1+N_2)) + p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2)\right]. \tag{2.10}$$

где $p_{jo}, p_{j\Delta}$ — парциальные давления соответствующих компонентов: $O_2(1)$ $CO_2(2)$,C0(3) на внутренней (0) и наружной (Δ) поверхностях приведенной пленки; $N_i = k_i / \alpha_D$ -диффузионно-химический критерии подобия для трех реакций (1,2,3), идущих на поверхности коксовой частицы.

Расход углерода составит

$$G_c = -\left[\frac{\alpha_D}{RT(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot\left[p_{1\Delta}(N_2+(N_1+N_2)(1+2N_3))+p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2)\right] \quad (2.11)$$

При увеличении критерия Se(Se>100) зона взаимодействия CO и O_2 станет бесконечно тонкой и реакция между ними будет происходить на расстоянии Δ_1 от поверхности частицы. (рис. 2.2). Тогда при ($p_{2\Delta}=0$).

$$\frac{\Delta_i}{\Delta} = 0.5\left(1-\frac{1}{N_3}\right); \quad (2.12)$$

$$p_{20} = \frac{p_{1\Delta}}{\left(1+\frac{\Delta_i}{\Delta}N_3\right)}; \quad (2.13)$$

$$p_{30} = \frac{2p_{1\Delta}N_3}{\left(1+\frac{\Delta_i}{\Delta}N_3\right)}\frac{\Delta_i}{\Delta}; \quad (2.14)$$

$$G_{20} = \left[\frac{2\alpha_D p_{1\Delta}N_3}{RT(1+N_3)}\right]; \quad (2.15)$$

$$G_C = G_{20} = \left[\frac{2\alpha_D p_{1\Delta}N_3}{RT(1+N_3)}\right]. \quad (2.16)$$

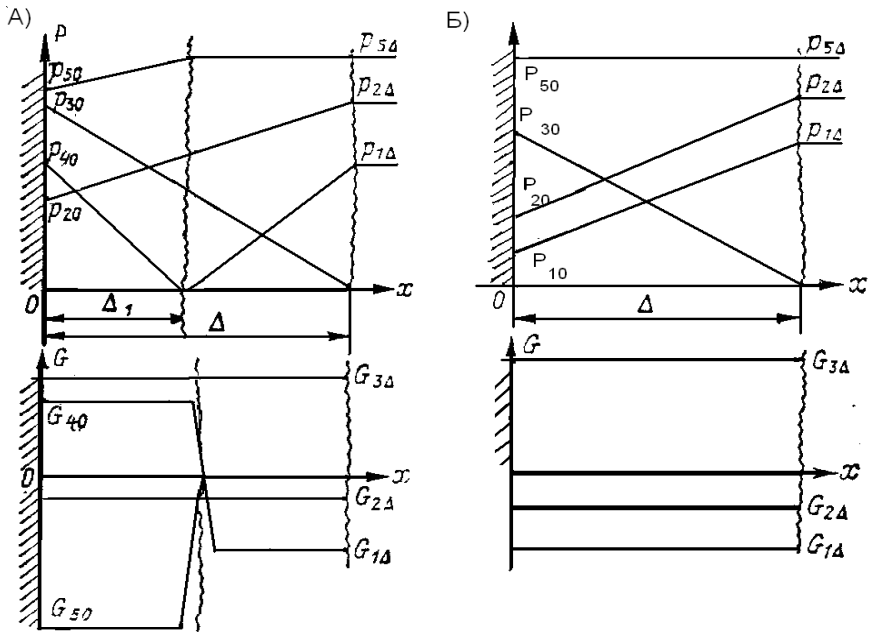


Рис. 2.2. Распределение парциальных давлений и потоков компонентов приведенной пленке при наличии водяных паров в потоке газов: а) горящий пограничный слой; б) не горящий пограничный слой.

При высоких скоростях восстановительных реакций и малых концентрациях кислорода он может полностью израсходоваться в пределах пограничного слоя. Если при этом критерий Семенова окажется больше 100, то зона горения водорода внутри приведенной пленки станет бесконечно тонкой и схема горения будет соответствовать схеме двойного горящего пограничного слоя (рис. 2.2). Через Δ_1 обозначаем расстояние от внутренней границы приведенной пленки до зоны горения водорода.

В результате решения системы уравнений получим следующие выражения для парциальных давлений и потоков компонентов:

$$p_{20} = \frac{p_{2\Delta}}{(1+N_3)}; \tag{2.17}$$

$$p_{30} = \frac{p_{2\Delta}N_3}{(1+N_3)} = \frac{N_{3'}}{(1+N_{3'})}(p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2}); \tag{2.18}$$

$$p_{40} = \frac{1}{(1+N_{3'})}(\frac{N_{3'}p_{5\Delta}}{2} - p_{1\Delta}); \tag{2.19}$$

$$p_{50} = \frac{2p_{1\Delta} + p_{5\Delta}}{1+N_{3'}}; \tag{2.20}$$

$$\frac{\Delta_i}{\Delta} = \frac{N_{3'}p_{5\Delta} - 2p_{1\Delta}}{(2p_{1\Delta} + p_{5\Delta})N_{3'}}; \tag{2.21}$$

$$G_{1\Delta} = \left[\frac{\alpha_D N_{3'}}{RT(1+N_{3'})}\right] \cdot (p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2}); \tag{2.22}$$

$$G_2 = -\left[\frac{\alpha_D N_3}{RT(1+N_3)} p_{2\Delta}\right]; \tag{2.23}$$

$$G_3 = \frac{\alpha_D}{RT}\left[\frac{N_3}{(1+N_3)} p_{2\Delta} + \frac{N_{3'}}{1+N_{3'}}(p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2})\right]; \tag{2.24}$$

$$G_{40} = \left[\frac{\alpha_D N_{3'}}{RT(1+N_{3'})}\right] \cdot (p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2}); \tag{2.25}$$

$$G_{50} = -\left[\frac{\alpha_D 2N_{3'}}{RT(1+N_{3'})}\right] \cdot (p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2}); \tag{2.26}$$

$$G_C = \frac{\alpha_D}{RT}\left[\frac{N_3}{(1+N_3)} p_{2\Delta} + \frac{N_{3'}}{1+N_{3'}}(p_{1\Delta} + \frac{p_{5\Delta}}{2})\right]. \tag{2.27}$$

Условие, при котором кислород еще не будет достигать поверхности частицы, запишется так:

$$0.5N_{3'}p_{5\Delta} \geq p_{1\Delta} \tag{2.28}$$

При $p_{1\Delta} > 0.5N_{3'}p_{5\Delta}$ кислород достигнет поверхности частицы ($\Delta_1/\Delta=0$) и набор гипотетических реакций в этом случае будет:

1. $C+O_2 \rightarrow CO_2$;
2. $C+O_2 \rightarrow CO$;
3. $C+CO_2 \rightarrow CO$;

3'. $C+2H_2O \rightarrow CO+H_2$;

4'. $H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$.

Водород, образующийся по реакции $3'$,взаимодействует с кислородом по реакции $4'$на поверхности частицы, и скорость этого процесса будет определяться не скоростью относительно быстрой реакции $4'$, а скоростью образования водорода по реакции $3'$. Эта схема соответствует схеме горения с негорящим пограничным слоем. В результате решения системы уравнений получим следующие выражения для парциальных давлений и потоков компонентов:

$$p_{10} = \frac{p_{1\Delta} - 0.5N_{3'}p_{5\Delta}}{1+N_1+N_2}; \tag{2.29}$$

$$p_{20} = \frac{1}{1+N_3}\left(p_{2\Delta} + \frac{N_1}{1+N_1+N_2}(p_{1\Delta} - 0.5N_{3'}p_{5\Delta})\right); \tag{2.30}$$

$$p_{30} = \frac{1}{(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\left(p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2) + p_{1\Delta}\left[N_2(1+N_3)+N_1N_3\right] + \right. \\ \left. + 0.5N_{3'}p_{5\Delta}(1+N_1+N_2)\right); \tag{2.31}$$

$$G_1 = -\frac{\alpha_D\left[p_{1\Delta}(N_1+N_2) + 0.5N_{3'}p_{5\Delta}\right]}{RT(1+N_1+N_2)}; \tag{2.32}$$

$$G_2 = -\frac{\alpha_D}{RT}\left[\frac{1}{(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot\left[p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2) - N_1(p_{1\Delta} - 0.5N_{3'}p_{5\Delta})\right]; \tag{2.33}$$

$$G_3 = -\frac{\alpha_D}{RT}\left[\frac{1}{(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2) + \\ + \left[p_{1\Delta}(N_2(1+N_3)+N_1N_3) + 0{,}5p_{5\Delta}N_{3'}(1+N_1+N_2)\right]. \tag{2.34}$$

$$G_6 = -\frac{\alpha_D}{RT}\left[\frac{1}{(1+N_3)(1+N_1+N_2)}\right]\cdot(p_{1\Delta}[N_1(1+2N_3)+2N_2(1+N_3)]+ \\ +p_{2\Delta}N_3(1+N_1+N_2)+p_{5\Delta}N_{3'}(1+0{,}5N_1+N_3)) \qquad (2.35)$$

Данная методика расчета поверхностной скорости горения и потоков O_2, CO_2, H_2O, CO, H_2 может быть использована также при расчетах выгорания частиц топлива в топочном объеме слоевой топки (например, топок со свободно залегающим, зажатым, кипящим слоем, топок ПМЗ и др.). Эта методика позволяет уточнить выгорание частиц на второй половине пылеугольного факела в условиях малых концентраций кислорода.

При расчетах необходимо знать температуру коксовых частиц. Для этого воспользуемся зависимостью, предложенной на основании опытных данных В. И. Бабием и И. П. Ивановой:

$$\Delta T=0{,}206(1900-T_г)^{0,74}\delta^{-0,16}Co_{2,} \qquad (2.36)$$

где ΔT - превышение температуры частицы над температурой газового потока;$T_г$ - температура газов, К; δ - диаметр частицы, мм; CO_2 - концентрация O_2, %.

Если известны размеры частицы, давление и температурные условия процесса, а также состав среды, в которой происходит выгорание, то на основе этих исходных данных можно определить кинетические константы и условия массообмена. При определении коэффициента материального обмена α_D необходимо вначале найти скорость витания частиц в потоке. Коэффициент материального обмена можно найти по зависимости Nu=f(Re)— см. главу 3. Для частиц, витающих в потоке, наиболее удобной является формула Б. Д. Кацнельсона и Ф. А. Тимофеевой

$$Nu=2+0.03Pr^{0.33}Re^{0.54}+0.35Pr^{0.36}Re^{0.8};$$

для слоевых процессов возможно использовать приближенную зависимость

$$Nu_D = 0.1Re$$

Изменение размеров частицы (если считать ее шаром) в процессе выгорания может быть записано в виде

$$\pi\delta^2\rho_ч d\delta=-2MG_C\pi\delta^2 d\tau, \qquad (2.37)$$

откуда определится время выгорания

$$\tau = -\frac{\rho_ч}{2M}\int_{\delta_0}^{0}\frac{d\delta}{G_C} \qquad (2.38)$$

Если известна область протекания процесса, то найти G_C можно, воспользовавшись зависимостями, приведенными выше. В кинетической области горения ($N_1 + N_2 < 0.1$) скорость выгорания углерода G_C не зависит от размера частиц и выражение (2.38) легко интегрируется. В диффузионной области горения $N_1 + N_2 > 10$ величина $G_C \sim 1/\delta$, что также позволяет проинтегрировать выражение (2.38).

Наиболее сложной для расчета времени выгорания является промежуточная область горения ($0{,}1 \le N_1 + N_2 \le 10$), в которой $G_C = f(\delta)$. В этом случае можно решить интеграл (2.38) двумя путями: либо численным интегрированием, либо аппроксимацией G_C простой зависимостью вида

$$G_C = A/\delta^n, \quad (2.39)$$

где A - некоторый коэффициент; n - показатель степени, значения которого лежат в пределах 0-1.

Проинтегрировав (2.38), можно найти время выгорания коксовой частицы или изменение ее размеров за определенное время.

2.2. Примеры решения задач по теме «Горение топлива».

2.2.1. Определить область горения частиц антрацита в топке при температуре 1400 К, если известно, что размеры частиц $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$, 10^{-4} и 10^{-3} м.

Решение:

Энергия активации антрацита $E_1 = 140 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. По формуле (2.2) получим $k_{01} = 6.5 \cdot 10^4$ м/с. Используя зависимость Аррениуса, найдем, что при $T_ч = 1400\,К$ константы скорости будут $k_1 = 0.424$ м/с; $E_2 = 1.1E_1 = 154 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $k_{02} = 1.3 \cdot 10^5$ м/с; при этом $k_2 = 0.23$ м/с.

Для расчета констант реакции догорания CO можно использовать следующие кинетические характеристики: $E_4 = 96.3 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $k_{04} = 7.05 \cdot 10^6$. При этом $k_4 = 19 \cdot 10^2$ 1/с.

Для малых частиц 10^{-4} и 10^{-4} м, скорость витания которых невелика, можно считать $Nu = 2$ (в условиях прямоточного факела). Отсюда $\alpha_D = 2D/\delta$. Для $T = 1400$ К $D_{O_2-N_2-CO_2} \approx 2.8 \cdot 10^{-4}$ м^2/с (для диффузии в много компонентной смеси отличие от этого значения в наших условиях будет небольшим). При этом для частицы $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м $\alpha_D = 2 \cdot 2.8 \cdot 10^{-4} / (5 \cdot 10^{-5}) = 11.2$ м/с, а для $\delta = 10^{-4}$ м $\alpha_D = 2 \cdot 2.8 \cdot 10^{-4} / 10^{-4} = 5.6$ м/с. Границе кинетической области соответствует $N_1 + N_2 = 0.1$.

В наших условиях для $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м

$$k_1 / \alpha_D + k_2 / \alpha_D = 0.424 / 11.2 + 0.23 / 11.2 \approx 0.058,$$

а для $\delta = 10^{-4}$ м

$$N_1 + N_2 = 0.117,$$

т. е. процесс горения этих частиц протекает в кинетической области.

Оценим влияние реакции 2.4 (реакции догорания CO у поверхности частицы). Так как $D_{CO-O_2} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ м^2/с, то для $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м

$$Se = \sqrt{1900 \cdot 3.1 \cdot 10^{-4}} / 11.2 \approx 0.07 < 0{,}4,$$

а для $\delta = 10^{-4}$ м

$$Se = 0.14 < 0.4,$$

т. е. имеем негорящий пограничный слой.

Для более крупной частицы $\delta = 10^{-3}$ м скорость витания в наших условиях можно найти, получим $W_B \approx 2.7$ м/с.

Тогда

$$Re = 2.1 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^{-4}) \approx 13;$$

$$Nu = 2 + 0.16 Re^{2/3} = 2.86.$$

В наших условиях

$$\alpha_D = 2.86 \cdot 2.8 \cdot 10^{-4} / 10^{-3} \approx 0.8 \text{ м/с};$$

$(k_1 + k_2)/\alpha_D = (0.424 + 0.23)/0.8 \approx 0.8$,

т. е. имеем промежуточную область, когда диффузия и кинетика практически равноценно определяют выгорание.

Определим схему выгорания. Для этого рассчитаем критерий

$Se = \sqrt{1900 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}/0.8 \approx 1$.

Таким образом имеем схему с горящим пограничным слоем.

2.2.2. Определить парциальное давление кислорода на поверхности горящей углеродной частицы (антрацит) $\delta = 10^{-4}$ м, находящейся в топке при температуре 1400 К. Оценить расход кислорода или углерода в первый период, когда еще не произошло существенного изменения размеров частицы. Парциальное давление кислорода в объеме составляет 10 кПа, углекислоты 10 кПа.

Решение:

Будем использовать те же кинетические характеристики, что и в примере 2.2.1. Тогда при заданных условиях $\kappa_1 = 0{,}424$ м/с; $\kappa_2 = 0{,}23$ м/с; $\kappa_3 = 5 \cdot 10^{-4}$ м/с; Коэффициент диффузии $D_{O_2-N_2} = 2.8 \cdot 10^{-4}$ м^2/с; $D_{CO_2-N_2} = 2.2 \cdot 10^{-4}$ м^2/с.

Как было показано в примере 2.2.1, имеем $\alpha_D = 5.6$ м/с и соответственно $N_1 = 0{,}076$; $N_2 = 0{,}041$; $N_3 = 0{,}9 \cdot 10^{-4}$, т.е. негорящий пограничный слой; тогда воспользовавшись выражением (2.5), определим $p_{10} = 10/(1 + 0.076 + 0.041) = 8.6$ кПа, т.е. поверхностная концентрация отличается от объемной при заданных условиях процесса только на 14%.

Для потока кислорода или расхода углерода в этих условиях (кинетическая область и негорящий пограничный слой) можно воспользоваться зависимостью (2.11):

$$Gc = \frac{5.6}{8.31 \cdot 1400 \cdot (1 + 0.9 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 + 0.076 + 0.041)} \times \{10 \cdot [0.041 + (0.076 + 0.41) \cdot (1 + 0.9 \cdot 10^{-4} \cdot 2)] +$$

$$+ 10 \cdot 0.9 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0.76 + 0.041)\} = 6.12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2\text{с}} = 7{,}35 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}.$$

2.2.3. Оценить (приближенно) время выгорания частицы антрацитного кокса при температуре 1400 К. Известно, что горение происходит в топочной среде и среднее парциальное давление газовых компонентов $p_{1\Delta} = p_{2\Delta} = 10$ кПа. Начальный размер частицы δ_0 равен 10^{-4} м.

Решение:

Для определения времени выгорания частицы воспользуемся выражением (2.37). В предыдущей задаче было показано, что при каких условиях мы имеем кинетическую область и негорящий пограничный слой, т.е. определения Gc можно использовать формулу (2.11). Для мелкой частицы, как показано в задаче 1, Re<<1. Тогда Nu =2, откуда, $\alpha_D = 2D/\delta$ т.е. α_D будет возрастать с уменьшением размеров частицы.

Для заданных условий N_1 = 0,076; N_2 = 0,041; N_3 = $0{,}9\cdot10^{-4}$, причем значение этих критериев будут уменьшаться по мере выгорания. Тогда учитывая N_1, N_2, N_3 будут много меньше 1, можно упростить выражение (2.11).

$$Gc = \frac{\alpha_D}{RT}\left[p_{1\Delta}(2N_2 + N_1) + N_3 p_{2\Delta}\right];$$

кроме того, если учесть, что $N_3 << N_1$ и N_2 и что по мере выгорания процесс будет все глубже переходить в кинетическую область, то

$$G_6 = \frac{p_{1\Delta}}{RT}(k_1 + 2k_2),$$

т.е. поток углерода не зависит от размеров частицы, а является только функцией температуры от парциального давления кислорода в объеме. При этом время выгорания после интегрирования будет

$$\tau = \rho_ч A \delta_0,$$

где $A = \dfrac{RT}{2M p_{1\Delta}(k_1 + 2k_2)} = \dfrac{8.314\cdot1400}{2\cdot12\cdot10\cdot(0.424+0.23)} = 74.2$;

т.е.

$$\tau = 1300\cdot74.2\cdot10^{-4} = 9.64\,\text{с}.$$

2.2.4. Рассчитать изменения констант скорости реакций $C + O_2 = CO_2$; $2C + O_2 = 2CO$; $C + H_2O = CO + H_2$ в диапазоне температуры 800-1800 К (интервал температуры 200 К) для коксовой частицы с энергией активации $E_1 = 120 \cdot 10^3$ кДж/кмоль.

Решение:

$-k_{0i} = 10^{0.2 \cdot 10^{-4} E_i + 2}$,

$E_2 = 1.1E_1$,

$E_3 = 2.2E_2$,

$E_{3'} = 1.6E_1$,

$E_1 = 120 \cdot 10^3$ кДж/кмоль

$k_i = k_{0i} e^{-E_i / RT}$

Тогда, значение констант скорости реакций составит (результаты приведены в таблице 2.1)

Таблица 2.1 – Результаты расчета констант скорости реакций

Т, К	Значение констант реакций к, м/с			
	$C+O_2=CO$	$2C+O_2=2CO$	$C+CO_2=2CO$	$C+H_2O=CO+H_2$
800	$3{,}63 \cdot 10^{-4}$	$0{,}104 \cdot 10^{-3}$	$1{,}110 \cdot 10^{-10}$	$1{,}9 \cdot 10^{-7}$
1000	0,0134	0,0055	$3{,}03 \cdot 10^{-7}$	$6{,}38 \cdot 10^{-5}$
1200	0,149	0,678	$6{,}04 \cdot 10^{-5}$	$2{,}999 \cdot 10^{-3}$
1400	0,832	0,515	0,00265	0,0469
1600	3,02	2,13	0,045	0,369
1800	8,23	6,41	0,41	1,838

3. Аэродинамика процессов горения

3.1. Аэродинамика процессов горения. Расчет развития струй

Уменье грамотно продумать аэродинамику топочного процесса дает возможность гарантировать:

1) заданное движение воздушно-газовых струй в топочном пространстве;

2) необходимое время пребывания частиц горючего в рабочем пространстве топки и достаточное выгорание горючих составляющих;

3) надежное воспламенение поступающей в топку горючей смеси за счет рециркуляции к корню факела достаточного количества горячих газов.

При этом сложные аэродинамические задачи распадаются на ряд более простых: расчет развития струй в топочной камере; расчет взаимодействия струй; расчет движения частицы в потоке; фильтрацию газов через засыпки и т. д.

Рассмотрим основные закономерности, необходимые для решения этих задач.

Простейший вид струи - прямоточная турбулентная струя. Она может развиваться в свободном пространстве, в попутном или встречном потоке. Для прямоточной турбулентной затопленной струи можно воспользоваться расчетами зависимостями, представленными в табл. 3.1.

Коэффициент *a* характеризует структуру струи, ее начальную турбулентность и неравномерность поля скоростей на выходе из сопла. При $\mathrm{Re} > 2 \cdot 10^4$ коэффициент *a* не зависит от Re. При равномерном поле на выходе из сопла его принимают: для круглой струи $a = 0{,}07 \div 0{,}08$; для плоской струи $a = 0{,}1 \div 0{,}12$. С увеличением неравномерности выходного поля скоростей *a* растет.

Таблица 3.1 – Расчетные зависимости для прямоточной турбулентной затопленной струи

Расчетный параметр	Тип струй		Номер
	Круглая осесимметричная	Плоская	Формулы
Длина начального участка (от среза сопла) $S_0, м$	$\frac{0,67R_0}{a}$	$\frac{1,03d_0}{a}$	(3.1)
Расстояние полюса струи от среза сопла $h_0, м$	$\frac{0,26R_0}{a}$	$\frac{0,41d_0}{a}$	(3.2)
Граница струи на основном участке $R_{гр}, b_{гр}, м$	$R_{гр} = 3,3R_0\frac{w_0}{w_м}$	$b_{гр} = 2,4b_0\frac{w_0}{w_м}$	(3.3)
Затухшие скорости на оси струи $w_м / w_0$	$\frac{0,96}{\frac{aS}{R_0}+0,29}$	$\frac{1,2}{\sqrt{\frac{aS}{b_0}+0,41}}$	(3.4)
Скорость в поперечном сечении струи w, с/м	$w_м\left[1-\left(\frac{y}{R_{гр}}\right)^{3/2}\right]^2$	$w_м\left[1-\left(\frac{y}{b_{гр}}\right)^{3/2}\right]^2$	(3.5)
Измерение массы струи $(M_x - M_0)/M_0$	$2,3\frac{aS}{R_0}$	$1,5\sqrt{\frac{aS}{2b_0}}$	(3.6)
Энергия струи E_x / E_0	$0,56\frac{R_0}{aS}$	$1,5\sqrt{\frac{2b_0}{aS}}$	(3.7)

В случае если плоская струя распространяется в попутном (встречном) потоке, движущемся со скоростью $w_н$, следует учитывать влияние потока на профиль струи и изменение скоростей. При этом нарастание толщины струи на начальном участке подчиняется, так же как и для затопленной струи, линейному закону $d = C_X$ (где С - коэффициент, равный для начального участка затопленной струи 0,27, для основного участка 0,22 и для встречной струи 0,30).

В попутном потоке струя расширяется медленнее:

$$d = C\frac{1-m}{1+m}x, \text{ где } m = \frac{w_н}{w_0};\ C \approx 0,3. \qquad (3.8)$$

$$Re_\delta = \frac{w_в \delta}{v} \text{ - пример Рейнольдса.}$$

где v- кинематическая вязкость $м^2/с$

Одной из важнейших особенностей прямоточных струй является малость поперечных составляющих скорости в любом сечении. В связи с этим в инженерных расчетах ими можно пренебречь. Установлено подобие безразмерных полей скоростей избыточных температур во всех поперечных сечениях основного участка и в пограничном слое начального участка турбулентных струй любой формы, распространяющихся в неограниченном пространстве и в попутном или встречном потоке.

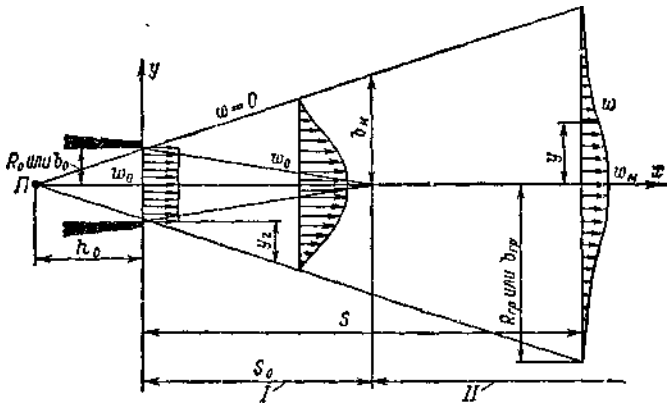


Рис. 3.1 Схема развития свободной затопленной турбулентной струи /—начальный участок; // — основной участок

Профиль безразмерной скорости в пограничном слое начального участка турбулентных струй может быть рассчитан согласно зависимости

$$\frac{w_0 - w}{w_0 - w_н} = (1 - \eta^{3/2})^2, \qquad (3.9)$$

где $\eta = (y - y_2)/d_н$ - безразмерная ордината;

$d_Н$ - толщина пограничного слоя в конце начального участка.

Профиль безразмерной избыточной скорости для любого поперечного сечения основного участка турбулентных струй можно рассчитать по формуле

$$\frac{\Delta w}{\Delta w_М} = \frac{w - w_Н}{w_М - w_н} = (1 - \xi^{3/2})^2, \qquad (3.10)$$

где $\xi = y/d$ - безразмерная ордината на основном участке,

d - полуширина рассматриваемого сечения в основном участке струи. Безразмерные профили избыточной температуры и концентрации примесей в струе связаны с профилем избыточной скорости так:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_M} = \frac{T - T_H}{T_M - T_H} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_M} = \frac{\mu - \mu_H}{\mu_M - \mu_H} = 1 - \xi^{3/8} = \sqrt{\frac{\Delta w}{\Delta w_M}}, \qquad (3.11)$$

где T, T_M, T_H - соответственно температура в данной точке струи на оси струи и окружающем потоке; μ, μ_M, μ_H - соответственно концентрация примеси в данной точке струи, на оси струи и окружающем потоке.

Закон падения избыточной температуры и концентрации примеси вдоль оси основного участка струи дают выражение для круглой струи

$$\frac{\Delta T_M}{\Delta T_0} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_0} = \frac{0,7}{aS/R_0 + 0,29}; \qquad (3.12)$$

для плоской струи

$$\frac{\Delta T_M}{\Delta T_0} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_0} = \frac{1,04}{(aS/d_0 + 0,41)^{1/2}}, \qquad (3.13)$$

где T_0 и μ_0 - начальные значения температуры и концентраций примеси в струе.

Развитие закрученных струй отличается большей интенсивностью смешения с потоком, большим углом раскрытия струи и меньшей дальнобойностью, чем у прямоточных струй.

На начальном участке закрученной струи поток является трехмерным и полный вектор скорости в осесимметричной закрученной струе имеет в каждой точке три составляющие: осевую w_x, радиальную w_y и тангенциальную w_z. Радиальная составляющая быстро затухает по радиусу и вдоль струи, поэтому в первом приближении можно рассматривать только осевую и тангенциальную составляющие вектора скорости. Изменение этих составляющих по радиусу и вдоль оси струи подчиняется отличным друг от друга закономерностям.

Основные аэродинамические характеристики закрученных струй определяются в значительной степени безразмерным интегральным параметром крутки

$$n = \frac{4M}{KD}, \qquad (3.14)$$

где $M = 2\pi\rho\int_0^\infty w_x w_z r^2 dr$ - главный момент количества движения струи;

D - диаметр завихрителя; для сплошных струй это диаметр цилиндрического канала, а для кольцевых - эквивалентный диаметр;

$K = 2\pi\int_0^\infty (\rho_{CT} + \rho w_x^2) r dr$ - главный вектор количества движения в проекции на ось струи.

В подписи к рис. 3.2 приведены формулы для расчета параметра крутки в одиночных кольцевых струях с учетом конструктивных характеристик завихрителя. Изменение максимальной скорости на начальном участке зависит от параметра крутки n, и ее изменение по длине струи при $1{,}2 \le n \le 5$ может быть представлено зависимостями:

$$\frac{w_{xT}}{w_0} = (1{,}2 - 0{,}2n)\left(\frac{x}{D_a}\right)^{-0{,}5} \text{ при } 0{,}2 < \frac{x}{D_a} < 1; \qquad (3.15)$$

$$\frac{w_{xT}}{w_0} = (1{,}2 - 0{,}2n)\left(\frac{x}{D_a}\right)^{-2/3} \text{ при } 1 < \frac{x}{D_a} < 4, \qquad (3.16)$$

где w_{xM} - максимальная осевая скорость в данном сечении.

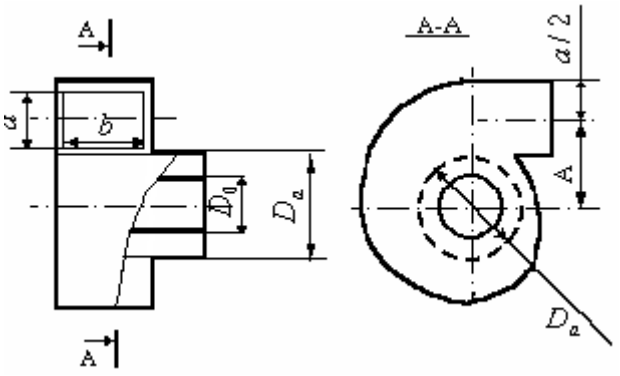


Рис. 3.2. К расчету параметра крутки *n* в зависимости от конструктивных характеристик завихрителя

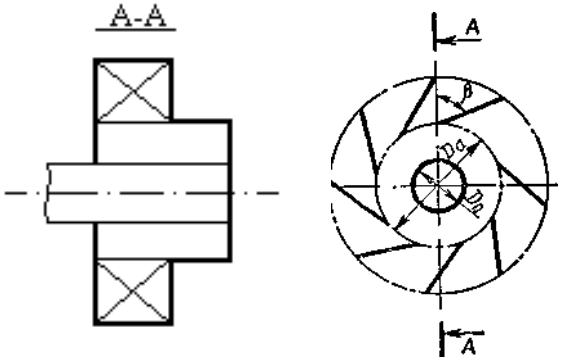
I - улиточный аппарат

a и b - ширина и длина подводящего патрубка;

A - расстояние от оси горелки до оси патрубка;

D_a и D_0 - соответственно наружный и внутренний диаметр кольцевого канала; конструктивный параметр крутки $n = \pi A D_э /(ab)$.

где $D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$ —эквивалентный диаметр



II — тангенциальный направляющий аппарат

/ - длина лопатки;

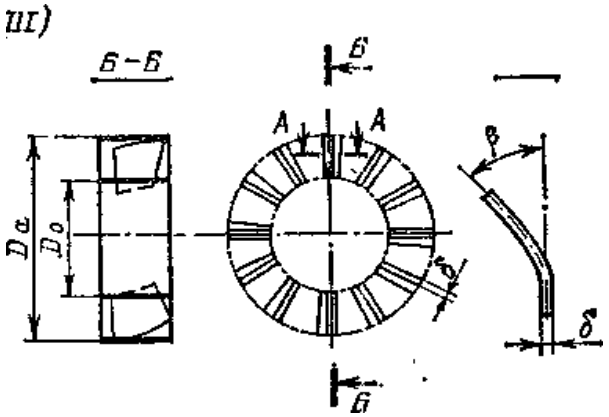
β - угол наклона лопатки;

D_a и D_0 - соответственно наружный и внутренний диаметр цилиндрического канала; конструктивный параметр крутки

$$n = \frac{\pi D_э}{1/z} \frac{\sin\beta}{\sin\frac{180^O}{z}\cos\left(\beta - \frac{180^O}{z}\right)},$$

где z -число лопаток;

$D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$ - эквивалентный диаметр



III — осевой направляющий аппарат

β - угол наклона лопаток к оси горелки,

δ - толщина лопатки;

D_a и D_0 - соответственно наружный н внутренний диаметр цилиндрического кольцевого канала; конструктивный параметр крутки

$$n = \frac{2\pi R_a D_э \operatorname{tg}\beta}{\varepsilon z (D_a - D_0)},$$

где z - число лопаток;

$D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$ - эквивалентный диаметр;

$D_a = \sqrt{D_0^2 - D_a^2/8}$ - радиус приложения равнодействующей скорости потока;

e - расстояние между серединами лопаток во входном сечении регистра;

$$\varepsilon = \frac{\pi(D_0 + D_a)}{2z} - \delta .$$

Изменение массы струи M можно с достаточной точностью описать зависимостью

$$\frac{M_x - M_0}{M_0} = (0{,}32 + 0{,}4n)\frac{x}{D_a} \qquad (3.17)$$

Наружная граница закрученной струи на начальном участке может быть определена для отношения $w_x / w_{xm} = 0{,}1$ и описывается выражением

$$\frac{y_2}{D_a} = (0{,}26 + 0{,}07n)\frac{x}{D_a} + 0{,}5 \qquad (3.18)$$

при $0{,}2 < x/D_a < 3$.

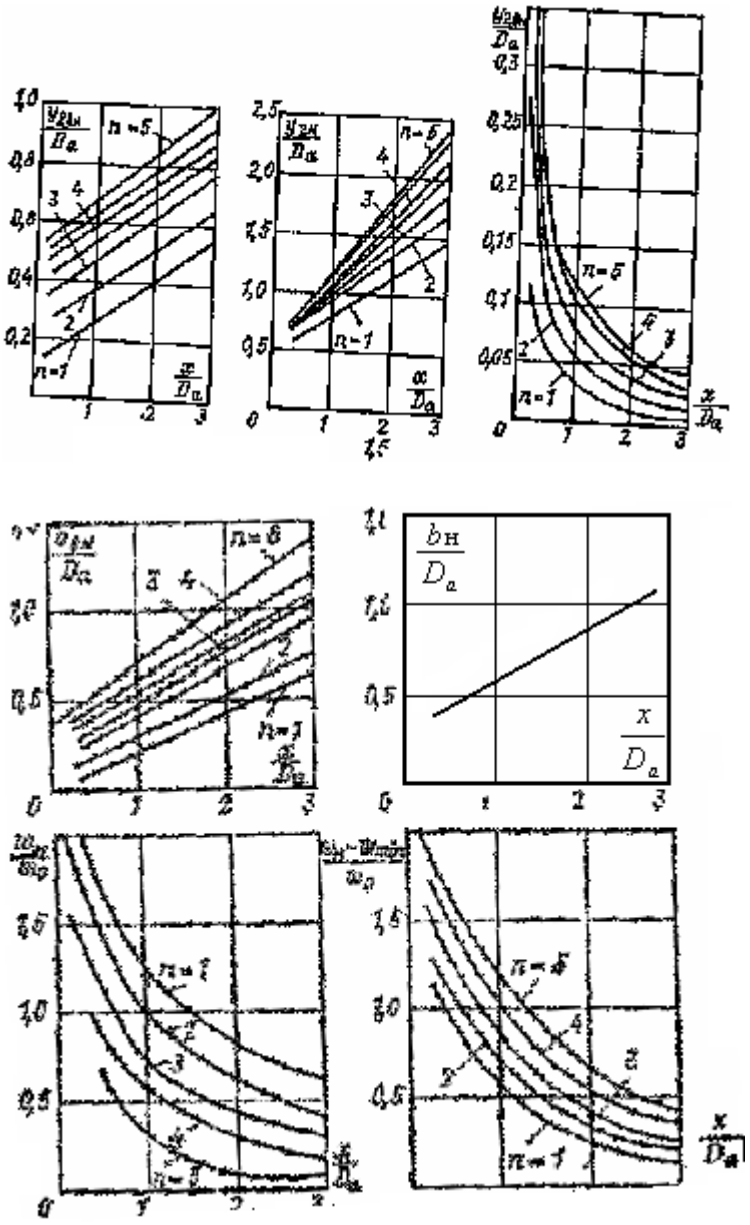


Рис. 3.3. Графики для расчета параметров закрученной струи

Чем больше интенсивность крутки, тем больше зона рециркуляции и большое количество газов рециркулирует к устью горелки. Размер зоны обработки токов могут быть описаны эмпирическими формулами

$$\frac{l_{рец}}{D_a} = 0{,}7n^{2/3} + 0{,}8 \qquad (3.19)$$

$$D_{рец} / D_a = 0{,}1n + 0{,}26, \qquad 1 < n < 4, \qquad (3.20)$$

где $l_{рец}$ — длина зоны обратных токов, а $D_{рец}$ — диаметр этой зоны.

Для закрученных струй не удается найти универсального профиля скоростей для всей области течения. Обработка экспериментальных данных показала, что на начальном участке закрученных струй можно выделить две области течения, в которых профили скоростей приближенно подобны. Внутренняя область течения располагается от оси струи до поверхности максимальных скоростей, а внешняя область простирается от поверхности максимальных скоростей до внешней границы струи.

Безразмерные профили скоростей для внутренней области описываются формулой

$$\frac{w_{xм} - w_x}{w_{xм} - w_{x\min}} = (1 - \eta_{вн}^{3/2})^2 \qquad (3.21)$$

а для наружной области

$$\frac{w_x}{w_{xm}} = 1(1 - \eta_н)^2 \qquad (3.22)$$

где

$$\eta_{вн} = \frac{y - y_{2вн}}{b_{вн}}; \qquad \eta_н = \frac{y_{2н} - y}{b_н}.$$

На основе обобщения экспериментальных данных построены кривые (рис. 3.3), позволяющие определить границы струи, ширину пограничного слоя для различных областей и другие величины, необходимые для расчета профиля скоростей.

3.2. Примеры решения задач по теме «Аэродинамика процессов горения».

3.2.1. Рассчитать и построить профиль осесимметричной, круглой в сечении затопленной струи, вытекающей из сопла радиусом Ro = 0,05 м с начальной скоростью W_0 = 20 м/с. Построить поля скоростей в струе по

сечениям, удаленным от среза сопла на расстояние 0,25 м, 0,5 м; 1 м; 1,5 м. Начальный профиль скоростей в струе считать равномерным (а = 0,08).

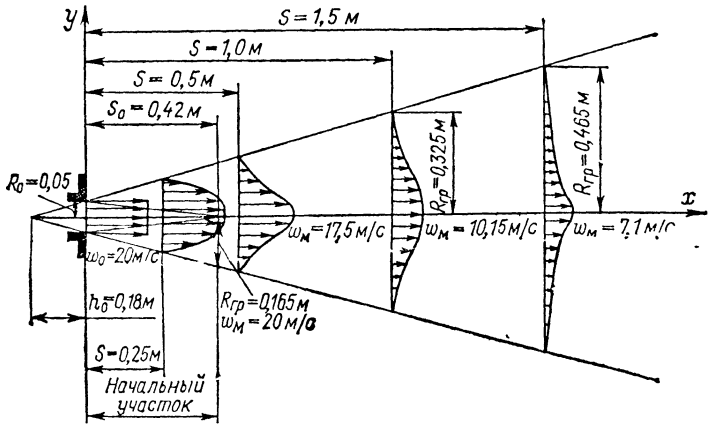


Рис. 3.4. Результаты расчета развития затопленной круглой струи (к примеру 3.3.1)

Решение.

Найдем протяженность начального участка струи и положение полюса струи - см. табл. 3.1 и формулы (3.1) и (3.2):

$$S_0 = 0{,}67\ R_0/a = 0{,}67 \cdot 0.05/0{,}08 = 0{,}42$$

$$h_0 = 0{,}29\ R_0/a = 0{,}29 \cdot 0{,}05/0{,}08 = 0{,}18$$

Зная протяженность начального участка струи и радиус сопла, оценим внешний радиус струи в конце этого участка:

$$R_{гр}=3{,}3R_0W_0/W_м = 3{,}3 \cdot 0{,}05\text{-}20/20=0{,}165 \text{ м}.$$

Теперь можно оценить скорость на оси струи для заданных участков. Для начального участка характерно постоянство скорости на оси и сохранение ее равной начальной скорости, поэтому для сечения с S= 0,25 м $W_м$ = 20м/с. Остальные сечения лежат за границей начального участка в зоне основного участка струи.

Таблица 3.2 – Результаты расчета протяженности начального участка струи и положение полюса струи

S, м	$R_{гр}$	*y,* м	$y/R_{гр}$	$(y/R_{гр})^{3/2}$	$[1-(y/R_{гр})^{3/2}]^2$	$w_м$,, м/с	*w,* м/с
0,5	0,188	0,06 0,12 0,18	0,319 0,638 0,957	0,180 0,509 0,936	0,672 0,241 0,004	17,5	11,76 4,22 0,07
1,0	0,325	0,08 0,16 0,24 0,32	0,246 0,492 0,738 0,985	0,122 0,345 0,634 0,977	0,77 0,429 0,1339 $9\cdot10^{-6}$	10,15	7,826 4,354 1,359 $9\cdot10^{-5}$
1,5	0,465	0,09 0,18 0,27 0,36 0,45	0,193 0,387 0,580 0,774 0,967	0,085 0,240 0,442 0,681 0,951	0,637 0,577 0,311 0,102 0,0024	7,1	5,943 4,097 2,208 0,724 0,017

Для расчета W_M воспользуемся формулой (3.4)

Результаты расчета

S, м……. 0,5 1,0 1,5

$w_м$,, м/с……17,.5 10, 157,1

Аналогично наружный радиус струи для сечения, расположенных за начальным участком:

S, м……. 0,5 1,0 1,5

$R_{гр.}$, м……0,188 0,325 0,465

3.2.2. Оценить длину начального участка S_0 и положение полюса плоской турбулетной затопленной струи , вытекающей со скоростью $\omega_0 = 30$ м/с из сопла полушириной $b_0 = 0{,}25$ м. Построить профиль скоростей на расстоянии $S = 3{,}5$ м от среза сопла. Коэффициент a, характеризующей начальную структуру струи , принять равны 0,1.

Решение:

Определить длину начального участка

$$S_0 = \frac{1{,}03 \cdot b_0}{a};$$

$$S_0 = \frac{1{,}03 \cdot 0{,}25}{0{,}1} = 2{,}58\ \text{м}.$$

Положение полюса плоской турбулетной затопленной струи

$$h_0 = \frac{0{,}41 \cdot b_0}{a}$$

$$h_0 = \frac{0{,}41 \cdot 0{,}25}{0.1} = 1{,}025\ \text{м}$$

Построить профиль скоростей на расстоянии $S = 3{,}5\ \text{м}$ от среза сопла

$$b_{ГР1} = 2{,}4b \cdot \frac{\omega_0}{\omega};$$

$$b_{ГР1} = 2{,}4 \cdot 0{,}25 \cdot \frac{30}{30} = 0.6\ \text{м}$$

$$y_1 = b_{ГР_1} - b_0 = 0{,}6 - 0{,}25 = 0{,}35\ \text{м}$$

$// S_0 = 2{,}51\ \text{м}$

$S = 3{,}5\ \text{м}$ -начальный участок струи //

$$\frac{\omega_М}{\omega_0} = \frac{1{,}2}{\sqrt{\frac{as}{b_0}} + 0{,}41};$$

$$\omega_М = \frac{1{,}2 \cdot \omega_0}{\sqrt{\frac{as}{b_0}} + 0{,}41}$$

$$\omega_М = \frac{1{,}2 \cdot 30}{\sqrt{\frac{0{,}1 \cdot 3.5}{0{,}25}} + 0.41} = \frac{36}{1{,}35} = 26{,}7\ \text{м/с}$$

$$b_{ГР_2} = 2{,}4 \cdot b_0 \frac{\omega_0}{\omega_м}$$

$$b_{ГР_2} = 2{,}4 \cdot 0{,}25 \cdot \frac{30}{26{,}7} = 0{,}67\ \text{м}$$

$$y_2 = 0{,}67 - 0{,}25 = 0{,}42\ \text{м}$$

Ответ: $S_0 = 2{,}58\ \text{м};\ h_0 = 1{,}025\ \text{м}$

3.2.3. Оценить параметр крутки n_1, n_2, n_3 для горелок с различным закручивающим аппаратом:

1.Улиточный аппарат:

$D_a = 0{,}5\text{м}; D_0 = 0{,}2\text{м}; A = 0{,}6\text{м}; a = 0{,}4\text{м}; b = 0{,}6\text{м};$

2.Тангенциальный направляющий аппарат:

$D_a = 0{,}5\text{м}; D_0 = 0{,}2\text{м}; l = 0{,}3\text{м}; \beta = 60^0; z = 9.$

3.Осевой направляющий аппарат:

$D_a = 0{,}5\text{м}; D_0 = 0{,}2\text{м}; z = 9; \beta = 30^0; \delta = 0{,}01.$

Решение :

1) Улиточный аппарат:

$$n_1 = \frac{\pi A D_э}{(ab)},$$

где $D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$ – эквивалентный диаметр;

$$n_1 = \pi A \frac{\pi A \sqrt{D_a^2 - D_0^2}}{ab}$$

$$n_1 = \frac{3{,}14 \cdot 0.6 \cdot \sqrt{0{,}5^2 - 0{,}2^2}}{0{,}4 \cdot 0{,}6} = 3{,}6.$$

2) Тангенциальный направляющий аппарат:

$$n_2 = \frac{\pi D_э}{2lz} \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\frac{180}{z} \cdot \cos(\beta - \frac{180^0}{z})},$$

где $D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$

$$n_2 = \pi \cdot \frac{\sqrt{D_a^2 - D_0^2}}{2lz} \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\frac{180^0}{z} \cdot \cos(\beta - \frac{180^0}{z})}$$

$$n_3 = 3{,}14 \cdot \frac{\sqrt{0{,}5^2 - 0{,}2^2}}{2 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}9} \cdot \frac{\sin 60^0}{\sin 20^0 \cos(60^0 - 20^0)} = 0{,}89.$$

3) Осевой направляющий аппарат:

$$n_3 = \frac{2\pi R_a D_э \operatorname{tg}\beta}{ez(D_a - D_0)},$$

где $D_э = \sqrt{D_a^2 - D_0^2}$; $R_a = \sqrt{(D_a^2 + D_0^2)/8}$; $e = \frac{\pi(D_0 + D_a)}{2z} - \delta$;

$$n_3 = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot \sqrt{0{,}2^2 + 0{,}5^2} / 8 \cdot \sqrt{0{,}5^2 - 0{,}5^2}}{(\frac{3{,}14(0{,}2 + 0{,}5)}{2 \cdot 9} - 0{,}01)9 \cdot (0{,}5 - 0{,}2)} = 1{,}045 .$$

3.2.4. Как измениться масса струи в сечении, где ее максимальная скорость равна $\omega_м$= 10 м/с. Начальная скорость струи составляла ω_0=30 м/с, струя круглая в сечении, турбулентная и движется в неподвижной среде. Радиус сопла R_0= 0,1 м; а = 0,075.

Решение:

Изменение массы струи можно определить из соотношения:

$$\frac{M_x - M_0}{M_0} = \frac{2{,}3 \cdot a \cdot S}{R_0};$$

$$\frac{\omega_м}{\omega_0} = \frac{0{,}96}{\frac{a \cdot S}{R_0} + 0{,}29} \quad \Rightarrow \quad \frac{a \cdot S}{R_0} = 096 \cdot \frac{\omega_0}{\omega_м} - 0{,}29;$$

$$S = (0{,}96 \cdot \frac{\omega_0}{\omega_м} - 0{,}29) \cdot \frac{R_0}{a};$$

$$\frac{M_x - M_0}{M_0} = \frac{2{,}3 \cdot a}{R_0} \cdot (0{,}96 \cdot \frac{\omega_0}{\omega_м} - 0{,}29) \cdot \frac{R_0}{a} = 5{,}96 \Rightarrow M_x = 5{,}96 \cdot M_0 .$$

Следовательно, масса струи в сечении увеличится примерно в шесть раз.

3.2.5. Изотермическая струя воздуха вытекает из круглого сопла радиусом R_0=0,1 м в неподвижную среду с той же температурой, но заполненную азотом. Определить концентрацию кислорода в сечении, где максимальная скорость струи составляет $\omega_м$=15 м/с, если начальная скорость ее была ω_0=30 м/с (разностью плотностей среды и струи пренебречь).

Решение:

$$\frac{\mu_м}{\mu_0}=\frac{\mu_м-\mu_0}{\mu_0-\mu_н}=\frac{T_м}{T_0}=\frac{0,7}{\frac{a\cdot S}{R_0}+0,29}\quad;$$

$$\frac{\omega_м}{\omega_0}=\frac{0,96}{\frac{a\cdot S}{R_0}+0,29}\quad\Rightarrow\quad a\cdot S=(\frac{\omega_0}{\omega_м}\cdot 0,96\cdot R_0-0,29\cdot R_0)=(\frac{30}{15}\cdot 0,96\cdot 0,1-0,29\cdot 0,1)=0,163;$$

$$\frac{\mu_м}{\mu_0}=\frac{0,7}{\frac{a\cdot S}{R_0}+0,29}=\frac{0,7}{0,1+0,29}=0,078=7,8\%.$$

Контрольные задачи по теме «Аэродинамика процессов горения»

3.2.6. Струя воздуха с температурой 500 К вытекает в воздушную среду с температурой 300 К. Определить температуру на оси струи на расстоянии 2м от среза сопла, если известно, что $R_0=0,2; a=0,071$.

3.2.7 Определить максимальную скорость в сечении $\frac{x}{D}=2$ для закрученной струи, выходящей из горелки с улиточным закручивающим аппаратом. Конструктивные и режимные характеристики горелки принять следующими: a=0.4 м;b=0.6 м; $D=0,2m$; $D_a=0,5m$; $\omega_0=20m/s$; A=0.6м.Определить в заданном сечении наружную границу струи. На сколько увеличится масса струи к указанному сечению?

3.2.8 Оценить размеры зоны обратных токов для горелки с осевым закручивающим аппаратом, если известно, что горелка имеет следующие конструктивные параметры: $D_a=0.5m;\ D_0=0.2m;\ \delta=0.01m;\ \beta=30^\circ;\ z=9$.

3.2.9 Какова критическая скорость псевдоожижения для шаровых кварцевых частиц в воздухе, если известно, что $\rho_Г=1,29\frac{кг}{м^3}$; $\nu_Г=1,4\cdot 10^{-5}\frac{м^2}{с}$;

$\delta_A=0,9\cdot 10^{-3}м$; $\rho_m=2500\frac{кг}{м^3}$.

4. Сжигание жидкого топлива

4.1 Особенности горения жидкостей.

Сжигание жидкого топлива всегда протекает в паровой фазе, причем испарение обеспечивается подводом тепла из зоны горения паров. В разного рода двигателях, камерах сгорания и топках жидкое топливо всегда сжигается в распыленном виде. Крайним случаем горения капель является диффузионное горение, когда скорость сгорания паров очень велика по отношению к скорости диффузии паров и окислителя к зоне горения, толщина которой становится исчезающе малой. К такому режиму может приближаться горение сравнительно крупных капель. В диффузионной теории горения, развитой Г.А. Варшавским, решаются совместно уравнения диффузии (с учетом стефановского потока, см. главу 3) и теплообмена, при этом учитывается расход тепла на испарение и перегрев паров. При постоянной температуре среды и концентрации кислорода в ней изменение диаметра капли определяется законом Б. И. Срезневского

$$\delta^2 = \delta_0^2 - K \cdot \tau, \qquad (4.1)$$

где δ_o - начальный диаметр капли;

τ - время,

К - коэффициент горения.

По выводам диффузионной теории при отсутствии заметной передачи тепла излучением из зоны горения

$$K = \chi \frac{4Nu}{\rho_ж} \int_{T_{тов}}^{T_г} \frac{\lambda dT}{C_{рп}\left[r_{исп}/C_{рп} + (T - T_{пов})\right]}, \qquad (4.2)$$

где $\rho_ж$ - плотность жидкости;

$Nu = \alpha\delta/\lambda$ -критерий Нуссельта;

$\lambda -$ теплопроводность парогазовой смеси;

$T_г$ и $T_{пов}$ - температура в зоне горения и температура поверхности капли;

$c_{рп}$ - удельная теплоемкость паров в процессе при постоянном давлении;

$r_{исп}$ - удельная скрытая теплота испарения;

χ – не сильно превосходящий единицу множитель, дающий поправку на положение зоны горения внутри окружающей каплю приведенной неподвижной газовой пленки (условной), в которой протекают молекулярные процессы теплопроводности и диффузии и происходит горение паров.

Расчет поправки χ дается в примере 4.1. Если ввести средние эффективные значения λ и $C_{рп}$,то

$$K = \chi \frac{4Nu\lambda}{\rho_{ж} c_{рп}} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + T_{Г} - T_{пов}}{r_{исп}/c_{рп}}. \qquad (4.3)$$

Температура в зоне горения при отсутствии заметного излучения определяется формулой

$$T_{Г} = T_{ср} + \frac{T_{а} - T_{ср}}{Le} = T_{ср} + \frac{M_{ок} Q_{р} p_{1ср}}{M_{Г} \beta_{ст} c_{рг} PLe}, \qquad (4.4)$$

где $Le = a/D_{ок}$ - критерий Льюиса;

a и D_{0K} - температуропроводность среды и коэффициент диффузии окислителя (средние значения);

$M_{ок}$ и $M_{г}$ - молекулярные массы окислителя и газовой среды;

$c_{рг}$ - удельная теплоемкость газовой среды в процессе при постоянном давлении;

$\beta_{ст}$ - стехиометрический коэффициент;

$Q_{р}/\beta_{ст}$ - теплота сгорания в пересчете на единицу массы окислителя:

$p_{1ср}$ и P - парциальное давление окислителя в среде и общее давление газовой смеси (всюду неизменное).

Температура поверхности капли $T_{пов}$, совпадающая с температурой смоченного данной жидкостью (мокрого или влажного) термометра, ниже температуры кипения $T_{кип}$ жидкости при заданном давлении P. Если пренебречь расходом тепла на прогрев жидкости, то температура поверхности $T_{пов}$ определяется из условия подвода тепла из зоны горения к поверхности с учетом расхода тепла на испарение и перегрев паров.

При этом необходимо связать давление паров у поверхности с температурой поверхности, считая, что пары у поверхности насыщены. Приближенно давление насыщенных паров у поверхности можно определить с помощью соотношения

$$P_{п.поз} = P\exp\left[-\frac{M_П r_{исп}}{RT_{кип}}\left(\frac{T_{кип}}{T_{пов}}-1\right)\right], \qquad (4.5)$$

где $M_п$ - молекулярная масса паров.

Давление паров в зоне диффузионного горения равно нулю. В конечном счете при использовании уравнений теплопроводности и диффузии получается выражение (см. пример 4.2)

$$\frac{T_{пов}}{T_{кип}} = \left\{1-\frac{RT_{кип}}{M_п r_{исп}}\cdot\cdots\left[1-\left(\frac{r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}{T_Г/T_{кип}-T_{пов}/T_{кип}+r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}\right)^{Le_П}\right]\right\}^{-1}, \qquad (4.6)$$

позволяющее вычислить отношение $T_{пов}/T_{кип}$.

В этом выражении $Le_п = \lambda RT/(M_п D_п Pc_{рп})$ - критерий Льюиса для паров; λ - средняя теплопроводность парогазовой среды; $D_п=D_{12}$ коэффициент диффузии паров в газе (среднее значение).

Все рассмотренное выше относится к горению сравнительно крупных капель, диаметром 0,5-1 мм и больше, когда режим горения в принципе может приближаться к диффузионному. Однако и при горении таких капель скорость сгорания паров получается в действительности не слишком большой по сравнению со скоростью испарения [1]. Зона горения по расчетам [1] оказывается протяженной, горение начинается ближе к поверхности капли, но пары не сгорают полностью (частично выносятся в окружающую среду), температура ниже рассчитанной по формуле (4.4). Тем не менее это слабо сказывается на самой скорости испарения жидкости (на коэффициенте горения K и скорости уменьшения диаметра капли), так как к поверхности подводится практически то же количество тепла, что и при диффузионном горении.

Проводя оценки, можно показать, что расчет коэффициента горения капли K по формулам диффузионной теории приводит к значениям, соответствующим опытным, если эффективное значение теплопроводности λ (по газу без учета присутствия паров, имеющих небольшую концентрацию вдали от поверхности капли) отнести к средней температуре $\overline{T_1} = T_{пов} + (T_Г - T_{пов})/4$, а эффективное значение удельной теплоемкости паров $c_{рп}$ отнести к средней температуре $\overline{T_2} = T_{пов} + (T_Г - T_{пов})/4$. Введение пониженной средней температуры для определения эффективного значения $c_{рп}$, строго говоря, не имеет достаточного обоснования. Однако при использовании более высоких значений $c_{рп}$ расчетные значения K оказываются явно заниженными. Реальный процесс горения паров у поверхности капли сложен, нагрев паров обеспечивается не только подводом тепла из зоны более высокой температуры, где сгорает основная масса паров, но и реагированием паров с окислителем в зонах, расположенных ближе к поверхности. Это формально приводит к понижению теплоемкости $c_{рп}$. При этом понижается эффективная температура горения, но влияние понижения температуры компенсируется уменьшением расстояния зоны тепловыделения от поверхности капли. По-видимому, введение в расчет по диффузионной теории пониженного значения эффективной теплоемкости паров позволяет косвенно учесть влияние указанных факторов.

Мелкие капли жидкого топлива диаметром в сотые и десятые доли миллиметра ведут себя в процессе горения иначе, чем крупные капли: мелкие капли в отличие от крупных не окружаются собственными факелами, а только испаряются, образуя газопаровую смесь, которая воспламеняется и горит по законам горения газов. При расчете испарения капель можно использовать формулы (4.1), (4.2) или (4.3), заменяя температуру горения $T_Г$ температурой окружающей среды $T_{ср}$,в которой происходит испарение (при этом $\chi = 1$).

4.2 Примеры решения задач теме «Сжигание жидкого топлива»

4.2.1. Определить радиус зоны горения и поправочный множитель χ при диффузионном горении капли жидкого топлива.

Решение.

Полагаем, что в диффузионном режиме горение локализовано в приведенной пленке, в которой осуществляются молекулярные процессы теплопроводности и диффузии. При этом не будем делать различия для тепловой и диффузионной приведенных пленок, т. е. их толщину будем считать одинаковой (что, строго говоря, верно только при числе Льюиса, равном единице). Не учитывая утолщения приведенной пленки за счет действия поперечного потока паров (что допустимо, если толщина пленки не мала в сравнении с радиусом капли), радиус приведенной пленки определим с помощью известного соотношения

$$r_{пл} = r_к Nu/(Nu-2),$$

где $r_к=\delta/2$ - радиус капли.

Для установления радиуса зоны горения $r_г<r_{пл}$ приравняем друг другу поток тепла из зоны горения в окружающую среду $Q_{ср}$ и мощность тепловыделения $Q_P G_n$, где G_n - поток паров к зоне горения; Q_P - теплота реакции, в расчете на полное сгорание паров (вообще говоря, за вычетом теплоты испарения данного жидкого топлива, однако теплотой испарения будем пренебрегать по сравнению с величиной Q_p, во всех расчетах). Можно принять (при отсутствии излучения)

$$Q_{ср} =4\pi\lambda(T_г-T_{ср})/[(1/r_г)-(1/r_{пл})],$$

где λ-средняя теплопроводность газа между зоной горения и окружающей средой.

Поток паров запишем так (учитывая, что $d\delta^2/d\tau=-K$):

$$G=-d/d\tau\cdot\rho_ж\pi\delta^3/6=\rho_ж\pi/4K\delta.$$

В итоге из соотношения

$$Q_{ср}=Q_p G_п$$

$$r_г/r_{пл}=(Nu - 2)/[(1+ b/K)Nu - 2],$$

$$r_г/r_к=Nu/[(1+b/K)Nu-2],$$

где $b=8\lambda(T_г-T_{ср})/(Q_р\rho_ж)$.

Поправочный множитель.

$$\chi=\frac{r_Г(r_{пл}-r_к)}{r_{пл}(r_Г-r_к)}=\frac{2/Nu}{1-r_к/r_Г}=[1-(b/K)Nu/2]^{-1}.$$

Приведенные формулы справедливы и при $Nu = 2$, когда $r_{пл}\to\infty$.

В данном случае

$$r_г/r_к = K/b,\ \chi = (1-b/K)^{-1}.$$

Например,

при $K = 10^{-6}$ м^2/с;

$\lambda = 0{,}1$ Вт/(м·К);

$T_г-T_{ср} = 1400$ К;

$Q_р = 4{,}2\cdot10^7$ Дж/кг;

$\rho_ж = 700$ кг/м^3 и

$Nu = 2$

получаем

$b = 3{,}8\cdot10^{-8}$ м^2/с;

$b/K = 3{,}8\cdot10^{-2}$; $r_г/r_к = 26$;

$\chi = 1{,}04$.

Если же при сохранении прочих условий

$Nu=4$ и $K=2\cdot10^{-6}$ м^2/с,

то $b/K=1{,}9\cdot10^{-2}$; $r_г/r_{пл} = 0{,}96$; $r_г/r_к=1{,}9$; $\chi=1{,}04$.

Оценки показывают, что и в других случаях значения χ несильно превосходят единицу: не превышают 1,1 при большей разности $T_г - T_{ср}$.

В приводимых ниже примерах и задачах в среднем можно принимать $\chi=1{,}05$; погрешность при этом не выйдет за пределы точности расчетов диффузионного горения капель. В случаях же испарения капель (без горения в пограничном слое) $\chi = 1$.

Заметим, что можно получить и другие выражения для $r_г$ и χ, приравнивая друг другу диффузионный поток паров, умноженный на стехиометрическии коэффициент $\beta_{ст}$, и диффузионный поток кислорода к зоне горения. При точном расчете в обоих вариантах значения $r_г$ и χ должны соответственно совпадать (расхождения могут быть за счет приближенности расчетов).

4.2.2. Определить температуру поверхности, горящей капли жидкого топлива.

Решение.

Диффузионное уравнение баланса тепла для испаряющейся капли имеет вид

$$-4\pi r^2 \lambda dT/dr = -\left[r_{исп} + c_{рп}(T - T_{пов})\right]G_п.$$

Определим поток паров G_n с помощью уравнения диффузии (с учетом стефановского потока)

$$G_п = 4\pi r^2 [M_п D_п P/(RT)] \cdot d \cdot \ln(1 - p_п/P)/dr.$$

При этом уравнение баланса тепла приводится к виду

$$Le_П dT/\left(r_{исп}/c_{рп} + T - T_{пов}\right) = d\ln(1 - p_п/P).$$

Принимая средние значения $Le_п$ и $c_{рп}$ после интегрирования в пределах по T от $T_{пов}$ до $T_Г$ и по $p_п/P$ от $p_{п.пов}/P$ до нуля (в зоне горения), получаем

$$\frac{p_{п.пов}}{P} = 1 - \left(\frac{r_{исп}/c_{рп}}{T_Г - T_{пов} + r_{исп}/c_{рп}}\right)^{Le_П}.$$

Далее, подставляя сюда $p_{п.пов}$ из формулы (4.5), приходим к формуле (4.6), определяющей температуру поверхности капли.

Пусть

$Le_п = 0{,}25$;

$RT_{кип}/(M_п r_{исп}) = 0{,}1$;

$r_{исп}/(c_{рп}T_{кип}) = 0{,}2$;

$T_1/T_{кип} = 7$.

Путем последовательных приближений из формулы (4.6) получаем

$$T_{пов}/T_{кип} = 0{,}95,$$

а с помощью формулы (4.5) находим $p_{п.пов}/P = 0{,}59$.

4.2.3. Учесть влияние излучения из зоны горения паров на скорость диффузионного сгорания капли жидкого топлива.

Решение.

С учетом лучистого потока $Q_{луч}$ из зоны горения к поверхности жидкости тепловой баланс для испаряющейся капли можно записать в следующей форме (сравнить с выражением без учета излучения в примере 4.2.2):

$$G_п[r_{исп}+c_{рп}(T-T_{пов})]=4\pi r^2\lambda dT/dr+ Q_{луч}.$$

Поглощением излучения в газе пренебрегаем. Перепишем это уравнение так:

$$dy/dr - Ay/r^2 + B/r^2 = 0,$$

где $y = r_{исп}/c_{рп} + (T - T_{пов})$; $A = G_п c_{рп}/(4\pi\lambda)$; $B = Q_{луч}/(4\pi\lambda)$.

Введем средние значения λ и $c_{рп}$ тогда величины A и B будут постоянными (G_n и $Q_{луч}$ рассчитанные на всю поверхность капли, не меняются по радиусу r; выражение для $Q_{луч}$ запишем позже).

Рассматриваемое уравнение является линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Интегрируя его в пределах по r от $r_к$ до $r_г$ и по y от $y_{пов} = r_{исп}/c_{рп}$ до $y_г = r_{исп}/c_{рп} + T_г - T_{пов}$, получаем

$$A = \frac{1}{1/r_к - 1/r_г}\ln\frac{y_Г - B/A}{y_{пов} - B/A} = \frac{1}{1/r_к - 1/r_Г}\ln\frac{r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов} - B/A}{r_{исп}/c_{рп} - B/A}.$$

Отсюда определяем поток паров

$$G_П = \frac{4\pi\lambda}{c_{рп}}\frac{1}{1/r_к - 1/r_Г}\ln\frac{r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов} - Q_{луч}/(G_П c_{рп})}{r_{исп}/c_{рп} - Q_{луч}/(G_П c_{рп})}.$$

Так как $G_n = p_ж\pi/4\delta K$,

где б = $2r_к$ - диаметр капли, то

$$K = \frac{8\lambda}{\rho_ж c_{рп}} \frac{1/r_к}{1/r_к - 1/r_Г} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов} - 2Q_{луч}\left(\rho_ж \pi r_к K c_{рп}\right)^{-1}}{r_{исп}/c_{рп} - 2Q_{луч}(\rho_ж \pi r_к K c_{рп})^{-1}}.$$

При ($Q_{луч}$ = 0 получаем формулу для *K* без учета излучения при $r_г$ = $r_{пл}$ или формулу (4.3) с поправочным множителем χ при $r_г$ < $r_{пл}$ (эти формулы непосредственно вытекают из первого соотношения в примере 4.2).

При $Q_{луч} \neq 0$ будем считать (имея в виду приближенность расчета), что величина $r_г$ не изменяется и если учесть излучение, причем примем

$$r_г = r_{пл} = r_к \, Nu/(Nu-2) \text{ для } Nu > 2$$

(с учетом излучения это условие должно выполняться строже, так как будет большее тепловыделение в зоне горения и в окружающую среду будет больше отводиться тепла и излучением и теплопроводностью).

Тогда

$$K = \frac{4Nu\lambda}{\rho_ж c_{рп}} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов} - 2Q_{луч}\left(\rho_ж \pi r_к K c_{рп}\right)^{-1}}{r_{исп}/c_{рп} - 2Q_{луч}(\rho_ж \pi r_к K c_{рп})^{-1}}.$$

Не будем также учитывать изменение температуры в зоне горения $T_г$ из-за влияния излучения, что допустимо, когда эта температура фактически определяется условиями разложения продуктов сгорания. Саму величину $Q_{луч}$ определим так (пренебрегая обратным излучением с поверхности капли из-за низкой температуры поверхности):

$$Q_{луч} = \varepsilon_{пр} \sigma T_г^{\,4} \cdot 4\pi r_к^{\,2},$$

где $\varepsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты;

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) - коэффициент излучения (постоянная Стефана - Больцмана).

По формулам лучистого теплообмена для рассматриваемого случая

$$\varepsilon_{пр} = [1 + (1/\varepsilon_г - 1)(г_к/г_г)^2 + 1/\varepsilon_к - 1]^{-1},$$

где $\varepsilon_г$ и $\varepsilon_к$ - степень черноты зоны горения и поверхности капли;

при этом, как было принято ранее, $r_г = r_{пл} = r_к Nu(Nu - 2)$.

Подставив ($Q_{луч}$ в формулу для К, приведем ее к виду: $K = K^0\omega$,

где $K = \frac{4Nu\lambda}{\rho_ж c_{рп}} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + (T_Г - T_{пов})}{r_{исп}/c_{рп}}$ - значение К без учета влияния излучения;

$$\omega = 1 + \frac{4Nu\lambda}{K^0 \rho_ж c_{рп}} \ln \frac{1 - 2Q_{луч}\left[\rho_ж \pi r_к K^0 \omega c_{рп}\left(r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов}\right)\right]^{-1}}{1 - 2Q_{луч}\left(\rho_ж \pi r_к K^0 \omega r_{исп}\right)^{-1}}$$

- поправочный множитель на влияние излучения.

Например, для капли изооктана диаметром 1 мм при температуре окружающего воздуха 1090 К и атмосферном давлении $T_г$ = 2500 К (с учетом диссоциации CO_2 и H_2O, см. пример 4.2.6); $p_ж$ = 620 кг/м^3; $\lambda = 8{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $c_{рп} = 3{,}45 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $r_{исп} = 2{,}73 \cdot 10^5$ Дж/кг; $T_{пов}$ = 353 К (температура адиабатного испарения)· и в случае Nu = 2,9; $r_{пл}=3{,}2r_к$; $\varepsilon_к$ = 0,95 (для углеводородных топлив); $\varepsilon_г$ = 0,001 (оценочно для зоны горения паров углеводородных топлив при рассматриваемых условиях), получаем K^0 = 1,5 мм^2/с; $\varepsilon_{пр} \approx 0{,}01$; $\omega \approx 1 + 0{,}1 = 1{,}1$.

Таким образом, влияние излучения при горении углеводородных топлив невелико (поправка порядка погрешности расчетов горения). Однако роль излучения возрастает при горении металлов - магния, алюминия, так как в зоне горения конденсируется окисел и степень черноты зоны горения заметно возрастает.

При дополнительном подводе тепла излучением температура поверхности будет несколько выше, но все же она будет ниже температуры кипения 372 К. Получающиеся различия в рамках проводимого расчета несущественны.

4.2.4. Вычислить коэффициент испарения мелких неподвижных капель этилового спирта C_2H_5OH при температуре среды (азот) 3000 К и атмосферном давлении $1{,}01 \cdot 10^5$ Па. Рассчитать время испарения капель с начальным диаметром δ = 0,01 и 0,1 мм. Исходные данные: температура

кипения этилового спирта при заданном давлени Т = 351 К; теплота испарения $r_{исп}$ = $8{,}25\cdot10^5$ Дж/кг; плотность жидкого этилового спирта при температуре кипения $\rho_ж$ = 790 кг/м^3. Средняя температура газовой среды близка к 1680 К. При этой температуре для азота λ = $9{,}1\cdot10^{-2}$ Вт/(м·К); удельная теплоемкость паров этилового спирта $c_{рп}$=$3{,}3\cdot10^3$ Дж/(кг- К); коэффициент диффузии паров в азоте при атмосферном давлении $D_п = D_{12} = 2{,}45\cdot10^{-4}$ м^2/с ($T_{ср}$=$T_г$).

Решение:

Вычисляем критерий Льюиса по формуле: $Le_П = \dfrac{\lambda RT}{D_П M_П c_{рп}} = 0{,}34.$

Вычисляем соотношения из формулы (4.6)

$$\frac{RT_{кин}}{M_П r_{исп}} = 7{,}68\cdot10^{-2}, \quad \frac{r_{исп}}{c_{рп}T_{кип}} = 7{,}12\cdot10^{-1}.$$

Определяем температуру поверхности $T_{пов}$ по формуле:

$$\frac{T_{пов}}{T_{кип}} = \left\{1 - \frac{RT_{кип}}{M_п r_{исп}} \cdots \left[1 - \left(\frac{r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}{T_Г/T_{кип} - T_{пов}/T_{кип} + r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}\right)^{Le_П}\right]\right\}^{-1}, \quad (4.6)$$

$\dfrac{T_{пов}}{T_{кип}} = 0{,}96.$ $T_{пов}$=337K.

Вычисляем коэффициент испарения капель этилового спирта по формуле:

$$K = \chi \frac{4Nu\lambda}{\rho_ж c_{рп}} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + (T_Г - T_{пов})}{r_{исп}/c_{рп}};$$

где χ = 1; Nu = 2. K = 0,6 мм^2/с.

Рассчитаем время испарения капель с начальным диаметром δ = 0,01 мм и 0,1 мм по формуле: $\tau = \delta^2 / K.$

$\tau_1 = 1{,}7\cdot10^{-4}$ с, для δ = 0,01 мм; $\tau_2 = 1{,}7\cdot10^{-2}$ с, для δ = 0,1 мм.

С увеличением диаметра капля испаряется медленнее.

4.2.5. Вычислить коэффициент испарения капель алюминия в атмосфере азота, при скорости обтекания средой ω = 10 м/с (для капель

диаметром δ = 0,1 и 0,5 мм). Давление атмосферное $1{,}01\cdot10^5$Па; температура среды $T_{ср}$= 3600 К. Температура кипения алюминия $T_{кип}$= 2950 К; теплота испарения $r_{исп}$= $9{,}2\cdot10^6$ Дж/кг; плотность жидкого алюминия $\rho_ж$= 2000 кг/м^3.

При расчетах физические величины отнести к температуре 3100 К; теплопроводность азота для этой температуры λ = $13{,}8\cdot10^{-2}$ Вт/(м·К). Удельная теплоемкость паров алюминия $c_{рп}$= (5/2)R/$M_п$= $7{,}7\cdot10^2$ Дж/(кг·К). Коэффициент диффузии паров алюминия в азоте $D_п$= $1\cdot10^{-3}$ м^2/с . Для температуры 3100 К, μ = $8{,}2\cdot10^{-5}$ кг/(м·с); ρ = M·P/(k·T) = 0,11 кг/м^3; ν = $7{,}4\cdot10^{-4}$ м^2/с.

Решение:

Критерий Нуссельта определить с помощью формулы А. П. Сокольского и Ф. А. Тимофеевой (Агафоновой):

$$Nu = 2 + 0{,}16\cdot Re^{2/3},$$

где Re = ωδ/ν - критерий Рейнольдса;

δ - диаметр капли.

Re = 1,35; Nu = 2,2; для δ = 0,1 мм.

Re = 6,76; Nu = 2,6; для δ = 0,5 мм.

Используя формулу (4.6) вычисляем отношение $T_{пов}/T_{кип}$

$$\frac{T_{пов}}{T_{кип}} = \left\{1 - \frac{RT_{кип}}{M_п r_{исп}} \cdots \left[1 - \left(\frac{r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}{T_Г/T_{кип} - T_{пов}/T_{кип} + r_{исп}/\left(c_{рп}T_{кип}\right)}\right)^{Le_П}\right]\right\}^{-1}, \quad (4.6)$$

Критерий Льюиса $Le_п$= λRT/($M_п D_п Pc_{рп}$), Le = 1,63.

Вычислим соотношения:

$RT_{кип}/(M_п r_{исп})$ = 0,095;

$r_{исп}/(c_{рп}T_{кип})$ = 4,05.

Для маленьких капель $T_г = T_{ср}$. $T_{пов}/T_{кип}$ = 0,9. $T_{пов}$ = 2680 К.

Вычисляем коэффициент испарения по формуле (4.3)

$$K = \chi \frac{4Nu\lambda}{\rho_ж c_{рп}} \ln \frac{r_{исп}/c_{рп} + T_Г - T_{пов}}{r_{исп}/c_{рп}}. \quad (4.3)$$

$K_1 = 0{,}09$ мм^2/с;

$K_2 = 0{,}11$ мм^2/с.

4.2.6. Рассчитать время диффузионного горения капель изооктана в условиях задачи 4.2.5.

Решение:

Вычисляем время горения капель по формуле:

$$\tau = \int_0^{\delta_0} \frac{d\delta^2}{m + n\delta^{2/3}} = \frac{3}{n^3}\left(m + n\delta_0^{2/3}\right)\left[0{,}5\left(m + n\delta_0^{2/3}\right) - 2m\right] + \frac{3}{n^3} m^2 \ln\left[\left(m + n\delta_0^{2/3}\right)/m\right] + 1{,}5m^2$$

где $m = K_2 = 1{,}3$ мм^2/с, значение K при Nu = 2;

$n = 0{,}16(\omega/\nu)^{2/3} K_2/2 = 1{,}2$ мм$^{4/3}$/с.

$n = 0{,}16[5/(1{,}3\cdot10^{-4}$ мм^2/с$)]^{2/3} \cdot 1{,}3/2 = 1{,}2$ мм$^{4/3}$/с.

$\delta_1 = 0{,}5$ мм; $\tau_1 = 0{,}13$ с.

$\delta_2 = 1$ мм; $\tau_2 = 0{,}46$ с.

4.2.7 Определить коэффициент диффузионного горения крупных неподвижных капель изооктана при температуре 870 К и атмосферном давлении в среде с пониженной концентрацией кислорода $P_{1ср}/P = 0{,}08$. Из-за низкой температуры в зоне горения диссоциацию продуктов сгорания не учитывать; принять $Q_р = 4{,}2\cdot10^7$ Дж/кг.

Теплопроводность азота и коэффициент диффузии паров изооктана в азоте отнести к температуре Т = 1000 К. Тогда $c_{рп} = 2{,}17\cdot10^3$ Дж/(кг·К). $\lambda = 6\cdot10^{-2}$ Вт/(м·К). $D_п = 0{,}45\cdot10^{-4}$ м^2/с. Учесть влияние свободной конвекции для капли диаметром 1 мм..

Решение.

Критерий Льюиса: $Le_п = \lambda RT/(M_п D_п P c_{рп})$, $Le_п = 0{,}44$.

Температура горения из формулы:

$$T_Г = T_{ср} + \frac{T_а - T_{ср}}{Le} = T_{ср} + \frac{M_{ок} Q_р p_{1ср}}{M_Г \beta_{ст} c_{рг} PLe},$$

$$T_г = 1730 \text{ К}.$$

Вычисляем температуру $T_{пов}$ по формуле (4.6):

$T_{пов}/T_{кип} = 0,7$. $T_{пов} = 430$ К.

Коэффициент горения по формуле (4.3) при Nu = 2:

K = 0,9 мм^2/с. Для оценок влияния свободной конвекции вычисляем критерий Нуссельта по формуле:

$$Nu = 2 + 0,56\left[P_г / (0,846 + P_г)^{1/4}\right](G_г P_г)^{1/4},$$

где Pr – критерий Прандтля, Pr = ν/a.

Gr – критерий Грасгофа,

β = 1/273 – коэффициент объемного расширения газа;

K-1.

Pr = 0,7.

Тогда

$$Nu = 2\ 0,42(Gr)1/4.$$

$$Gr \text{ эфф.} = 28 \cdot 102 \cdot 1500/1400 = 3000.$$

Тогда

$Nu = 2+0,42 \cdot (3000)1/4 = 5,1$.

Определяем К по формуле (4.3):

K = 4,4 мм^2/с.

Контрольные задачи по теме «Сжигание жидкого топлива»

4.2.8. Вычислить коэффициент диффузионного горения крупных капель изооктана, горящих в воздухе ($P_{1ср}/P$ = 0,21). Температура среды 1090К; давление P = 1,01·106 Па. Газовая среда неподвижна. Для заданного давления температура кипения $T_{кип}$ = 480 К; теплота испарения $r_{исп}$ =

1,87·105 Дж/кг; плотность жидкости при температуре кипения $\rho_ж$ = 530 кг/м^3; λ = 8,5·10.2 Вт(м·К). Коэффициент диффузии паров изооктана в азоте (при давлении 1,01·106 Па и температуре 1530 К) $D_п$ = 9,2·10-6 м^2/с. Эффективная средняя температура 990 К; при этой температуре $c_{рп}$ = 2,67·103 Дж/(кг·К), $c_{рп}$(азота) = 1,26·103 Дж/(кг·К).

Обратить внимание на то, что коэффициент диффузионного горения К капель изооктана при заданном повышенном давлении будет больше, чем при атмосферном давлении (в основном за счет уменьшения $\rho_ж$). К тому же влияние свободной конвекции будет более сильным, так как при повышенном давлении уменьшается кинематическая вязкость среды $\nu \approx 1/P$.

4.2.9. Рассчитать коэффициент диффузионного горения капель изооктана диаметром 0,5 и 1 мм в воздухе ($P_{1ср}/P$ = 0,21). Температура среды 1090К, давление атмосферное (Р=1,01·105Па). Газовая среда неподвижна. $T_{кип}$= 480 К; $r_{исп}$ = 1,87·105; $\rho_ж$= 530. При Т = 1450К теплопроводность азота λ = 8,1·10-2 Вт/(м·К), коэффициент диффузии паров $D_п$= 0,85·10-4 м^2/с; $c_{рп}$= 2,5·103 Дж/(кг·К). Считать, что капли обтекаются со скоростью ω = 5 м/с; ν = 1,3·10,4 м^2/с.

5. Диффузия и массообмен при горении

5.1. Особенности диффузии и массообмена при горении

Передача вещества в газе через ламинарный пограничный слой (подслой) осуществляется молекулярной диффузией. Для задач, имеющих отношение к горению, существенна концентрационная диффузия, а термодиффузией можно пренебречь (однако ее следует учитывать при горении водорода).

Плотность потока вещества, переносимого молекулярной диффузией при постоянной температуре в бинарной смеси идеальных (неплотных) газов, в системе центра масс выражается формулой

$$g_1 = -\frac{M_1 M_2}{M_{см}} \frac{PD_{12}}{RT} \operatorname{grad} \frac{p_1}{p} = -\rho D_{12} \operatorname{grad} Z_1 = -g_2, \qquad (5.1)$$

где $P=p_1+p_2$ - общее давление смеси;

p_1, p_2 - парциальные давления компонентов;

M_1,M_2 - их молекулярные массы;

$M_{см} = M_1 \frac{p_1}{p} + M_2 \frac{p_1}{p} = (M_1 - M_2)\frac{p_1}{p} + M_2$ - молекулярная масса смеси;

$\rho = \frac{PM_{см}}{RT}$ - плотность смеси;

$Z_1 = \frac{\rho_1 M_1}{M_{см} P}$ - относительная массовая концентрация первого компонента

(для второго компонента $Z_2 = 1\text{-}Z_1$);

$D_{12} = D_{21}$ - коэффициент взаимной диффузии компонент.

Формула (5.1) справедлива и в неизотермическом случае, если пренебречь термодиффузией. С учетом термодиффузии

$$g_1 = -\frac{M_1 M_2}{M_{см}} \frac{PD_{12}}{RT} \left(\operatorname{grad} \frac{p_1}{p} + \frac{k_T}{T} \operatorname{grad} T\right) = -g_2 \qquad (5.2)$$

где k_T - термодиффузионное отношение.

Величина k_T положительна (при не очень низких температурах), если индексом 1 отмечать более тяжелый компонент (или компонент с большими размерами молекул). Термодиффузионный поток этого компонента направлен в сторону более низких температур (против градиента температуры). Термодиффузионный поток второго компонента направлен встречно (и равен термодиффузионному потоку первого компонента).

Согласно выводам кинетической теории, Энского и Чепмена

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T^3 (M_1 + M_2)/(2M_1 M_2)}}{P\sigma_{12}^2 \Omega^{1,1^*} \cdot (T^*)}, \text{ [м}^2\text{/с]}, \qquad (5.3)$$

где $T = k \cdot T/\varepsilon_{12}$, ε_{12} [Дж], σ_{12} [Å]- параметры функции, выражающей потенциальную энергию взаимодействия молекул первого и второго компонента;

k- постоянная Больцмана;

$\Omega^{(1,1)^*}T^*$ - приведенный интеграл взаимодействия (столкновений) молекул первого и второго компонента.

С достаточной для практики точностью в расчетах можно использовать модель Леннарда-Джонса, по которой потенциальная энергия взаимодействия в зависимости от расстояния между молекулами *r* выражается формулой

$$\varphi_{12}(r) = 4\varepsilon_{12}\left[\left(\frac{\sigma_{12}}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{12}}{r}\right)^{6}\right], \qquad (5.4)$$

Величина σ_{12} выражается через величины σ_1 и σ_2 (близкие к диаметрам молекул первого и второго компонента) как среднее арифметическое:

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \qquad (5.5)$$

а величина ε_{12} через величины ε_1 и ε_2 для компонентов - как среднее геометрическое

$$\varepsilon_{12} = \sqrt{\varepsilon_1}\varepsilon_2, \qquad (3.6)$$

Значения интеграла $\Omega^{(1,1)^*}T^*$, вычисленного с использованием потенциала Леннарда - Джонса, приводятся для некоторых значений T^* в табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Значения приведенных интегралов $\Omega^{(1,1)^*}T^*$ и $\Omega^{(2.2)^*}T^*$ при использовании потенциала Леннарда - Джонса

T^*	$\Omega^{(1,1)*}$	$\Omega^{(2,2)*}$	T^*	$\Omega^{(1,1)*}$	$\Omega^{(2,2)*}$
0,5	2,066	2,257	7,0	0,7896	0,8727
1,0	1,439	1,587	8,0	0,7712	0,8538
1,5	1,198	1,314	9,0	0,7556	0,8379
2,0	1,075	1,175	10	0,7424	0,8242
2,5	0,9996	1,093	20	0,6640	0,7432
3,0	0,9490	1,039	30	0,6232	0,7005
3,5	0,9120	0,9999	50	0,5756	0,6504
4,0	0,8836	0,9700	100	0,5130	0,5882
4,5	0,8610	0,9464	200	0,4644	0,5320
5,0	0,8422	0,9269	400	0,4170	0,4811
6,0	0,8124	0,8963			

Для простейшей модели, в которой молекулы рассматриваются как твердые сферы, $\Omega^{(1,1)*} = \Omega^{(2,2)*} \equiv 1$. При этом не обеспечивается необходимая точность расчетов D_{12}, μ и λ.

Кинетическая теория Энскога и Чепмена применима и к формулам для динамической вязкости и теплопроводности газов

$$\mu = 2{,}67 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega^{2,2^*} \cdot (T^*)}, \tag{5.7}$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{2,2^*} \cdot (T^*)}, \tag{5.8}$$

Значения $\Omega^{(2,2)^*} T^*$ интеграла при использовании потенциала Леннарда-Джонса тоже приводятся в табл. 5.1. При расчете теплопроводности многоатомных газов к формуле (5.8) необходима поправка на влияние внутренних степеней свободы вращения молекул и колебания в них атомных ядер, Поправочный сомножитель Эйкена имеет вид

$$K = \frac{4c_v}{15R} + 3/5,$$

где c_v - молярная теплоёмкость при постоянном объеме.

Располагая опытными значениями вязкости или теплопроводности чистых газов (вязкость определяется в опытах значительно более точно, поэтому предпочтительно использовать данные по вязкости), можно с помощью формулы (5.7) или (5.8) и таблицы или формулы для $\Omega^{(2,2)^*} T^*$ определить параметры σ и ε для газов (значения σ и ε для некоторых газов приводятся в табл. 5.2). Затем эти величины можно использовать в расчетах коэффициента диффузии D_{12}, применяя формулы (5.5) и (5.6) для определения σ_{12} и ε_{12}. Сопоставление с имеющимися опытными данными показывает, что погрешности подобного рода расчетов не превышают 5-7%, т. е. не выходят за пределы точности опытов. Расчет теплопроводности и вязкости по формулам (5.7) и (5.8) также соответствует точности опытов.

Таблица 5.2 - Значения величин σ и ε для некоторых газов

Газ	σ, Å	ε/k, K	Газ	σ, Å	ε/k, K
H_2	2,92	38,0	CH_4	3,80	144,0
Воздух	3,69	84,0	C_2H_5OH	4,46	391,0
N_2	3,75	79,8	C_6H_6	5,27	440,0
O_2	3,54	88,0	C_6H_{14}	5,91	413,0
CO	3,71	88,0	Изооктан C_8H_{18}	7,79	428,0
CO_2	3,90	213,0			

Расчет диффузии в многокомпонентных газовых смесях сложен. В задачах горения допустимо (ввиду общей сложности таких задач и необходимости упрощений) использовать квазибинарную модель диффузии, противопоставляя рассматриваемому компоненту (отметим его индексом I) смесь остальных компонентов как единый газ. Соответствующий коэффициент диффузии может быть оценочно найден с помощью формулы

$$D_{1n} = \frac{I - x_1}{x_2/D_{12} + x_3/D_{13} + x_3/D_{13} + \ldots}, \qquad (5.9)$$

где $x_1 = p_1/P$; $x_2 = p_2/P$; $x_3 = p_3/P$ и т. д. - молярные доли компонентов в смеси;

D_{12}, D_{13}, D_{14} и т. д. - коэффициенты взаимной (бинарной) диффузии компонента 1 в смеси с компонентом 2, компонентом 3 и т. д.

Для бинарной смеси кинетическая теория Энскога и Чепмена позволяет рассчитать и термодиффузионное отношение k_T. Формулы оказываются сложными, а расчет по ним не обеспечивает нужной точности (в отличие от расчетов коэффициента диффузии, вязкости, теплопроводности). Особую важность имеет опытное определение k_T.

Для процессов переноса в турбулентном потоке

$$D_\tau \equiv \alpha_\tau \equiv \nu_\tau = l\omega' = l^2 d\omega/dy, \qquad (5.10)$$

где D_τ -коэффициент турбулентной диффузии (заменяющий коэффициент молекулярной диффузии в турбулентном потоке);

$\alpha_\tau = \lambda_\tau/\rho \cdot c_p$,

$\nu_т=\mu_т/\rho$ -турбулентная температуропроводность и теплопроводность;

$\mu_Т$ - турбулентная кинематическая и динамическая вязкость;

ω'- среднеквадратическая пульсационная скорость;

l - масштаб турбулентности.

В оценочных расчетах можно принять l=d,

где d - характерный поперечный размер канала (для трубы - это диаметр).

Приведенные соотношения (5.1) и (5.2) для диффузии отвечают случаю, когда в системе (на ее границах) не протекают физические или химические процессы. В противном случае возникает дополнительный молярный поток - стефановский поток (впервые введенный Стефаном при рассмотрении диффузионного испарения жидкости в газовую среду).

5.2. Примеры решения задач по теме «Диффузия и массообмен при горении»

5.2.1. Провести расчёт коэффициента диффузии для смесей кислород-азот , кислород -углекислый газ ,окись углерода - азот , окись углерода - кислород при температуре 1600 К и атмосферном давлении $1{,}01\cdot10^5$ Па. Привести коэффициент диффузии к давлению $1{,}01\cdot10^6$ и $1{,}01\cdot10^4$ Па

Решение.

Используем формулу

$$D_{12}=2{,}66\cdot10^{-2}\frac{\sqrt{T^3(M_1+M_2)/(2M_1M_2)}}{P\varepsilon_{12}^2\Omega^{(1,1)^*}(T^*)}$$

для кислорода $\varepsilon_1/k=88K$

для азота $\varepsilon_2/k=79.8K$

$$\varepsilon_{12}/k=\sqrt{88\cdot79{,}8}=84K$$

Для T=1600K имеем $T^*=1600/84=19{,}09$

$$\Omega^{(1,1)^*}(19{,}09)=0{,}7424-(0{,}7424-0{,}6640)\cdot0{,}4/10=0{,}7393$$

для кислорода $\sigma_1 = 3{,}54\,\text{Å}$

для азота $\sigma_2 = 3{,}75\,\text{Å}$

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{3.54 + 3.75}{2} = 3.645\,\text{Å}$$

$M_1(O_2) = 32$ кг/ моль

$M_2(N_2) = 28$ кг/ моль

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1600^3 (32+28)}{2 \cdot 32 \cdot 28}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 3{,}645^2 \cdot 0{,}7393} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{1{,}17 \cdot 10^4}{9{,}92 \cdot 10^5} = 3{,}14 \text{см}^2/\text{с}$$

Для смеси O_2-CO_2

для кислорода $\varepsilon_1 / k = 88\text{K}$

для углекислого газа $\varepsilon_2 / k = 213\text{K}$

$$T^* = \frac{1600}{\sqrt{88 \cdot 213}} = 11{,}18$$

$\sigma_{12} = (3{,}54 + 3{,}9)/2 = 3{,}72\,\text{Å}$

$\Omega^{(1,1)*}(11{,}68) = 0{,}7424 - (0{,}7424 - 0{,}6640) \cdot 0{,}68/10 = 0{,}737$

$M(O_2) = 32$ кг/кмоль

$M(CO_2) = 44$ кг/кмоль

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1600^3 (32+44)}{2 \cdot 32 \cdot 44}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}737 \cdot 3{,}72^2} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{1{,}05 \cdot 10^4}{1{,}03 \cdot 10^6} = 2{,}71\,\text{см}^2/\text{с}$$

Для CO-N_2

$$T^* = \frac{1600}{\sqrt{88 \cdot 79{,}8}} = 19{,}09$$

$\Omega^{(1,1)*}(19{,}09) = 0{,}7393$

$$\sigma_{12} = \frac{3{,}71 + 3{,}75}{2} = 3{,}73\,\text{Å}$$

$M(CO) = 28$ кг/кмоль

$M(N_2) = 28$ кг/кмоль

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1600^3 (28+28)}{2 \cdot 28 \cdot 28}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}7393 \cdot 3{,}73^2} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{1{,}26 \cdot 10^4}{1{,}038 \cdot 10^6} = 3{,}1 \text{ см}^2/\text{с}$$

Для $CO\text{-}O_2$

$$T^* = \frac{1600}{\sqrt{88 \cdot 88}} = 18{,}18$$

$$\Omega^{(1,1)*}(18{,}18) = 0{,}7424 - (0{,}7424 - 0{,}6640) \cdot 0{,}18/10 = 0{,}741$$

$$\sigma_{12} = \frac{3{,}71 + 3{,}54}{2} = 3{,}625 \text{ Å}$$

$M(CO) = 28$ кг/кмоль

$M(O_2) = 32$ кг/кмоль

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1600^3 (28+32)}{2 \cdot 28 \cdot 32}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}741 \cdot 3{,}625^2} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{1{,}17 \cdot 10^4}{0{,}83 \cdot 10^6} = 3{,}2 \text{ см}^2/\text{с}$$

5.2.2. Провести расчёт коэффициента диффузии для смеси паров изооктана с азотом при температурах 500,1000,1240,1450,1530 и 1640 K и атмосферном давлении $1{,}01 \cdot 10^5$ Па.

Решение.

Используем формулу

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T^3 (M_1 + M_2)/(2M_1 M_2)}}{P \varepsilon_{12}^2 \Omega^{(1,1)*}(T^*)}$$

$$\sigma_{12} = (7{,}79 + 3{,}75)/2 = 5{,}77 \text{ Å}$$

Для изооктана $\varepsilon_1/k = 428\text{K}$

Для азота $\varepsilon_2/k = 79.8\text{K}$

$$\varepsilon_{12}/k = \sqrt{428 \cdot 79{,}8} = 185\text{K}$$

Для T=500 K имеем T^* =500/185=2,7

$$\Omega^{(1,1)*}(2{,}7) = 0{,}99996 - (0{,}99996 - 0{,}949) \cdot 0{,}7/0{,}5 = 0{,}9286$$

$M(C_8H_{18}) = 114$ кг/кмоль

$M(N_2) = 28$ кг/кмоль

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{500^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}9286 \cdot 5{,}77^2} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{1{,}66 \cdot 10^4}{3{,}12 \cdot 10^6} = 0{,}14 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для 1000 К имеем $T^* = 1000/185 = 5{,}4$

$$\Omega^{(1,1)*}(5{,}4) = 0{,}8422 - (0{,}8422 - 0{,}8124) \cdot 0{,}4 = 0{,}83$$

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1000^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}83 \cdot 5{,}77^2} = 0{,}45 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для 1240 К имеем $T^* = 1240/185 = 6{,}7$

$$\Omega^{(1,1)*}(6{,}7) = 0{,}8124 - (0{,}8124 - 0{,}7896) \cdot 0{,}7 = 0{,}7964$$

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1240^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}7964 \cdot 5{,}77^2} = 0{,}65 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для 1450 К имеем $T^* = 1450/185 = 7{,}84$

$$\Omega^{(1,1)*}(7{,}84) = 0{,}7896 - (0{,}7896 - 0{,}7712) \cdot 0{,}84 = 0{,}774$$

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1450^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}774 \cdot 5{,}77^2} = 0{,}85 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для 1530 К имеем $T^* = 1530/185 = 8{,}27$

$$\Omega^{(1,1)*}(8{,}27) = 0{,}7712 - (0{,}7712 - 0{,}7556) \cdot 0{,}27 = 0{,}766$$

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1530^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}766 \cdot 5{,}77^2} = 0{,}92 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Для 1680 К имеем $T^* = 1680/185 = 9{,}08$

$$\Omega^{(1,1)*}(9{,}08) = 0{,}7556 - (0{,}7556 - 0{,}7424) \cdot 0{,}08 = 0{,}745$$

$$D_{12} = 2{,}66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1680^3 (28+114)}{2 \cdot 28 \cdot 114}}}{1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 0{,}745 \cdot 5{,}77^2} = 1{,}09 \text{ см}^2/\text{с}.$$

5.2.3. Рассчитать теплопроводность азота N_2 при температурах 500;1000;1240;1530;1680;2500 и 3600 К. При вычислении правки Эйкена принять для азота соответственно температурам c_υ = 2,6 R; 3R; 3,06R; 3,15R; 3,17R; 3,22R; 3,40R; 3,46R.

Решение.

Используем формулу

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)} \cdot K$$

где $K = \frac{4C_\upsilon}{15R} + \frac{3}{5}$

для азота $\sigma = 3{,}75\,\text{Å}$

$M(N_2) = 28$ кг/кмоль

$\frac{\varepsilon}{\kappa} = 79{,}8K$

При 500 K имеем $T^* = \frac{500}{79{,}8} = 6{,}27$

$$\Omega^{(2,2)*}(6{,}27) = 0{,}8963 - (0{,}8963 - 0{,}8727) \cdot 0{,}27 = 0{,}8899$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{500}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}8899} \cdot (\frac{4 \cdot 2{,}6R}{15R} + \frac{3}{5}) = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{4{,}226}{12{,}514} 1{,}293 = 3{,}6 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}.$$

При 1000 K имеем $T^* = \frac{1000}{79{,}8} = 12{,}53$

$$\Omega^{(2,2)*}(12{,}53) = 0{,}8242 - (0{,}8242 - 0{,}7432) \cdot 0{,}53/10 = 0{,}8199$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1000}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}8199} \cdot (\frac{4 \cdot 3R}{15R} + \frac{3}{5}) = 6 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}.$$

При 1240 K имеем $T^* = \frac{1240}{79{,}8} = 15{,}54$

$$\Omega^{(2,2)*}(15{,}54) = 0{,}8242 - (0{,}8242 - 0{,}7432) \cdot 0{,}54/10 = 0{,}8198$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1240}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}8198} \cdot (\frac{4 \cdot 3{,}06R}{15R} + \frac{3}{5}) = 6{,}8 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}.$$

При 1450 K имеем $T^* = \frac{1450}{79{,}8} = 18{,}17$

$$\Omega^{(2,2)*}(18{,}17) = 0{,}8242 - (0{,}8242 - 0{,}7432) \cdot 0{,}17/10 = 0{,}8228$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1450}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}8228} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3{,}15R}{15R} + \frac{3}{5}\right) = 7{,}5 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

При 1530 К имеем $T^* = \frac{1530}{79{,}8} = 19{,}17$

$$\Omega^{(2,2)^*}(19{,}17) = 0{,}8242 - (0{,}8242 - 0{,}7432) \cdot 0{,}17/10 = 0{,}8228$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1530}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}8228} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3{,}17R}{15R} + \frac{3}{5}\right) = 7{,}7 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

При 1680 К имеем $T^* = \frac{1680}{79{,}8} = 21{,}05$

$$\Omega^{(2,2)^*}(21{,}05) = 0{,}7432 - (0{,}7432 - 0{,}7005) \cdot 0{,}5/10 = 0{,}7411$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{1680}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}7411} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3{,}22R}{15R} + \frac{3}{5}\right) = 9 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

При 2500 К имеем $T^* = \frac{2500}{79{,}8} = 31{,}33$

$$\Omega^{(2,2)^*}(31{,}33) = 0{,}7005 - (0{,}7005 - 0{,}6504) \cdot 0{,}33/20 = 0{,}6997$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{2500}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}6997} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3{,}4R}{15R} + \frac{3}{5}\right) = 12 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

При 3600 К имеем $T^* = \frac{3600}{79{,}8} = 45{,}11$

$$\Omega^{(2,2)^*}(45{,}11) = 0{,}7005 - (0{,}7005 - 0{,}6504) \cdot 0{,}11/20 = 0{,}7002$$

$$\lambda = 8{,}32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{\frac{3600}{28}}}{3{,}75^2 \cdot 0{,}7002} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3{,}46R}{15R} + \frac{3}{5}\right) = 14{,}6 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

6. Распространение пламени в газовых смесях.

6.1 Нормальное распространение пламени в газовых смесях

При вынужденной зажигании (например, зажигание с помощью искры) предварительно перемешанного газового топлива критерием зажигания является распространение реакции из одного небольшого участка горючей смеси на весь ее объем. воспламенение горючей смеси происходит тогда, когда энергия, выделяемая источником зажигания, будет достаточна для создания высокой температуры и критической концентрации активных частиц в локальном объеме. поэтому для воспламенения горючих смесей применяют, как правило, насыщенные искры, которые позволяют в локальном объеме получить высокие температуры и концентрации активных частиц. Малляр и Ле-Шателье опытами по распространению пламени в трубах заполненных предварительно перемешанными топливными смесями, обнаружили что наблюдаются два предельных режима- начальное распространение у открытого конца и детонация, между которыми имеется режим равномерного распространения пламени, который называется режимом нормального распространения пламени.

Распространение пламени у открытого конца (равномерное движение) происходит при условии почти свободного расширения продуктов горения и при постоянном давлении с небольшими скоростями распространения. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в этом случае передача воспламенения от горючего слоя (пламени) к холодному происходит путем чистой теплопроводности. Напротив, в случае распространения с весьма большими скоростями, превышающим скорость звука. Неизбежна очень не значительное повышение давления за счет ударно- адиабатического сжатия, и поэтому механизм распространения должен быть связан со свойствами явления распространения скачков давления (ударные волны).

Первый тип распространения, т.е. чисто теплопроводный тип процесса, называют нормальным, а скорость, характеризующий этот процесс-нормальной скоростью перемещения пламени.

Опыты показывают, что при нормальном распространении пламени химические реакции протекают в очень тонком слое, отделяющем несгоревшую смесь от продуктов сгорания, называемом пламенем. Толщина фронта пламени даже медленно горячей смеси составляет доли миллиметра. Из-за плохой теплопроводности газов нормальное распространение пламени происходит медленно. Для реакции, протекающей в пламени, в качестве основной характеристики принимают скорость нормального распространения пламени $U_Н$, см/с. представляющую собой линейную скорость перемещения элемента фронта пламени относительно свежей смеси по направлению нормали к поверхности фронта в данном месте. В качестве характеристики можно взять и объем смеси, сгорающей на единице поверхности за единицу времени $U_Н$, $см^3/(см^2, с)$, а также тепловыделение в единицу времени на единицу площади фронта пламени, $кВт/м^2$.

Произведение U_m на плотность смеси ρ называется массой скорости горения U_m, $Г/(см^2, с)$.

$$U_m = \rho U_Н$$

Последняя представляет собой количество смеси, сгорающей в единицу времени на единице площади фронта пламени. При сравнении скорости распространения пламени в смесях, имеющую различную плотность вследствие различных температур или давления в них, удобно пользоваться массовой скоростью горения.

В смеси, находящейся в покое, пламя движется со скоростью $U_Н$ (рис.6.1). в смеси, движущейся напротив пламени со скоростью $W = -U_Н$,пламя занимает стационарное положение, а продукт сгорания отходят от фронта пламени со скоростью $U_г$.

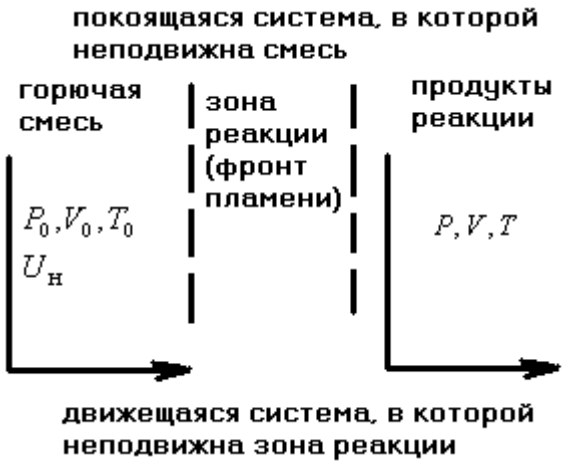


Рис. 6.1 – Схема распространения пламени в покоящейся смеси и в движущейся системе

Соотношение между $U_Н$ и $U_г$ можно определить из баланса количества вещества до и после горения. К единице площади фронта пламени ежесекундно подводится $U_Н\rho$ $Г/см^2$ свежей смеси, такое же количество продуктов сгорания отводится:

$$U_Н\rho_0 = U_г\rho_г$$

где ρ_0 и $\rho_г$ - соответственно, плотность свежей смеси и продуктов горения, $г/см^2$.

$U_г$-скорость движения продуктов сгорания см/с.

Скорость $U_г$, с которой продукты сгорания движутся относительно фронта пламени, равна скорости движения фронта пламени относительно продуктов сгорания. Следовательно,

$$\frac{U_Г}{U_Н} = \frac{\rho_0}{\rho_г}$$

Осуществляя процесс горения в потоке горючей смеси, можно получить стационарное пламя, для этого смесь должна поступать к фронту пламени со скоростью, равной нормальной скорости пламени $U_Н$. Продукты сгорания будут отходить от фронта пламени со скоростью $U_г$.

При горении в потоке распространении пламени сопровождается движением газа. Если же пламя распространяется в покоящемся газе, то и в этом случае имеет место движение, вызванное тепловым расширением. Движение газа искривляет и увеличивает фронт пламени. Так как зона горения очень тонка, то при искривлении фронта пламени структура зоны горения не будет нарушатся, а только будет увеличивается его поверхность. Вследствие этого скорость нормального распространения, а также и количество газа, сгорающего на единице поверхности, не будет меняется. Общее же количество газа, сгорающего за единицу времени, будет увеличивается пропорционально увеличению поверхности фронта пламени. Следовательно, нормальная скорость распространения пламени не зависит то гидродинамических условий, а зависит только от физико-химических свойств горючей смеси, т.е. является физико-химической константой.

Нормальный скорость распространения пламени $u_н$ называют скорость движения фронта пламени относительно исходной смеси, направленную по нормали к поверхности фронта горения в данном месте.

Поскольку для данной смеси на единицу поверхности фронта пламени сгорает в единицу времени одно и тоже количество вещества m то, очевидно, $u_н = m/p_0$ (ρ_0 - плотность исходного холодного газа) . Отсюда можно получить выражения закона Гуи-Михельсона

$$u_н = \omega \cos\varphi,$$

где ω-скорость потока,

φ - угол между направлением потока и нормали к поверхности фронта пламени.

Для любой формы пламени и любого распространения скоростей в потоке исходной смеси из этого соотношения можно получить:

$$u_н = V/S, \qquad (6.1)$$

где V - секундный расход исходной топливной смеси;

S - полная поверхность пламени. Формулой (1.6) часто пользуются при экспериментальном определении скорости распространения пламени.

Для аналитического расчета скорости распространения пламени при адиабатных условиях можно использовать формулу

$$Pe = 5{,}35 \cdot 10^{-2} \theta_0^5 \exp[-1{,}5E/(RT_A)], \qquad (6.2)$$

где $Pe = u_H^2/(\alpha\kappa_0)$ - критерий Пекле;

$a = \lambda/(p_0 c_p)$ - температуропроводность;

λ - теплопроводность;

c_P - удаленная теплоемкость исходной смеси.

Наличие теплоотвода приводит к уменьшению скорости распространения племени. В зависимости от относительного безразмерного критерии теплоотвода м/м пр. скорость распространения пламени может быть определена по формулам:

$$Pe_T / Pe_a = 0{,}365 + 0{,}635 \exp(-2{,}5\mu/\mu_{kp}), \qquad (6.3)$$

где $\mu = \alpha U/(F p_0 c_p \kappa_0)$ - безразмерный критерий теплоотвода;

α -коэффициент теплоотдачи от газа к стенке;

U - периметр камеры сгорания;

F – поперечное сечение камеры сгорания.

Критическое значение критерия теплоотвода (при учете лучистого теплообмена) рассчитывается по формуле:

$$\mu_{kp} = 6{,}25 \cdot 10^{-4} \exp(-0{,}28 Arr/\theta_0), \qquad (6.4)$$

Пользуясь формулой (6.2), можно при экспериментально определенной скорости распространении пламени u_H рассчитать суммарные кинетические константы горения: энергию активации E и предэкспоненциальный множитель константы скорости реакции κ_0. Ход их определения показан на примере 6.2.

Рассчитанные по данной методике кинетические константы горения некоторых газов в воздухе приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 Кинетические константы горения некоторых газов в воздухе

Газ	Энергия активации E, Дж/моль.	Предэкспоненциальный множитель κ_0, 1/с
Водород	129 800	$2{,}137 \cdot 10^{14}$
Окись углерода (влажная)	96 300	$1{,}4 \cdot 10^{12}$
Метан	103 800	$5{,}6 \cdot 10^{12}$
Пропан	61 500	$4{,}2 \cdot 10^{11}$
Окись углерода (сухая)	96 800	$7{,}05 \cdot 10^{8}$

Известно, что пламя может распространяется только при определенной концентрации горючего. Пределы, при которых возможно распространении пламени, носят название концентрационных петелов распространении пламени. Кроме того, распространение пламени зависит и от размеров сосуда, в котором происходит горение. Уменьшение диаметра сосуда приводит к уменьшению скорости распространении пламени. В объеме меньше определенно диаметра, называемого критическим диаметром распределении пламени в смеси с любой концентрацией горючего невозможно.

Используя формулы (6.3) и (6.4), можно определить характеристики смесей на пределе распределения пламени или рассчитать критический диаметр камеры, при котором пламя не может распространяться (см. пункт 6. 2).

6.2 Примеры решения задач по теме «Распространение пламени в газовых смесях»

6.2.1 Определить нормальную скорость распространения пламени, если в эксперименте на цилиндрической горелке радиусом r=10 мм получено конусное пламя с высотой конуса h=20 мм в горелку подавалось $V_{H_{2=}} = 3 \cdot 10^{-4} м^3/с$ водорода, который перед горелкой смешивался с воздухом. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1{,}1$.

Решение.

Определим количество воздуха, поступающего в горелку. Для этого по формуле (1.12) найдем теоретически необходимое количество воздуха:

$$V^0 = 0{,}0476 \cdot 0{,}5 \cdot 100 = 2{,}38 м^3/м^3 .$$

Действительное количество воздуха найдем по формуле (1.5):

$$V_В = 1{,}1 \cdot 2{,}38 = 2{,}62 м^3/м^3$$

Расход газовоздушной смеси через горелку

$$V = V_{H_2}(1 + \alpha V_0) = 3 \cdot 10^{24} \cdot (1 + 2{,}62) = 0{,}0011 м/с$$

Подставим площадь боковой поверхности конуса

$$S = \pi r\sqrt{h^2 + r^2}$$

в формулу (6.1), получим

$$u_Н = V/(\pi r\sqrt{h^2 + r^2});$$

$$u_Н = 0{,}0011/(3{,}14 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}02^2 + 0{,}01^2) = 1{,}57 м/с.$$

6.2.2.

$$\alpha = \frac{21}{21 - \theta_{2изб\%}} \qquad Воздух\begin{pmatrix} 21\% - O_2 \\ 79\% - N_2 \end{pmatrix}$$

$$\theta_2изб\% = O_2\% - 0{,}5CO\% + H_2\% + 2CH_4\%;$$

$$\theta_2изб\% = O_2\% + 2CH_4\%$$

№	$CH_4\%$	α	h, м	Uн, с/м	Та, К	$\theta^Р_{Н,} \frac{кДж}{м^3}$	$Сн_4$	$Q \cdot 10^{-5}$, $м^2/с$
1	6,5	-1,6	$25 \cdot 10^{-3}$	0,45	187,1	0,806	0,219	3,31
2	7	-1,5	$19 \cdot 10^{-3}$	0,58	179,8	0,884	0,226	3,36
3	8	-1,31	$13 \cdot 10^{-3}$	0,81	162,5	1,011	0,244	3,50

Теоретически необходимое количество воздуха:

$$V^0 = 0{,}0476[0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 1{,}5H_2S + 2C_мH_n - O_2]$$

1) $V_1^0 = 2{,}23 м^3/м^3$

$Vq = \alpha \cdot V_1^0 = 1{,}6 \cdot 2{,}23 = 3{,}56 м^3/м^3$-действительное количество воздуха.

Расход газо-воздушной смеси ч/з горелку:

$$V = Vсн_4(1 + \alpha V^0) = 4 \cdot 10^{-5}(1 + 3{,}56) = 18{,}24 \cdot 10^{-5} м^3$$

$$Uн_1 = V/(\pi r\sqrt{h^2 + r^2}) = 18{,}24 \cdot 10^{-5}/(3{,}14 \cdot 0{,}05\sqrt{0{,}025^2 + 0{,}005^2}) = 0{,}45 м/с$$

2) $V_2^0 = 2{,}28 м^3/м^3$

$Vq = 2{,}38 \cdot 1{,}5 = 3{,}42 м^3/м^3$

$V = Vсн_4(1 + \alpha V^0) = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 4{,}42 = 17{,}68 \cdot 10^{-5} м^3$

$Uн_2 = 17{,}68 \cdot 10^{-5}/(3{,}14 \cdot 0{,}005\sqrt{0{,}005^2 + 0{,}019^2}) = 0{,}58 м/с$

3) $V_3^0 = 2{,}38 м^3/м^3$

$Vq = 3{,}09 м^3/м^3$

$V = Vсн_4(1 + \alpha V^0) = 16{,}37 \cdot 10^{-5} м^3$

$Uн_3 = 16{,}37 \cdot 10^{-5}/(3{,}14 \cdot 0{,}005\sqrt{0{,}005^2 + 0{,}013^2}) = 0{,}81 м/с$

Теплота сгорания смеси:

$Q_н^р = 0{,}339C^р + 1{,}03H^р - 0{,}109(O^р - S^р) - 0{,}0251W^р;$

$Q_н^р = Q_{сH_4} \cdot CH_{4\%} + Q_{c_2H_4} \cdot C_2H_{45} + Q_{c_2H_6} \cdot C_2H_{6\%} + Q_{c_3H_6} \cdot C_3H_{\wedge\%} + Q_{H_2} \cdot H_{2\%} + Q_{c_0} \cdot CO_{\%}$

$Q_{CH_4} = 0{,}1264 кДж/м^3(\%)$-теплота сгорания компонентов горючего газа .

$CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, H_2, CO.$-объемные доли в %.

Теоретическая температура:

1) $Ta_1 = \dfrac{\theta_н^р + Vввo \cdot Свозд \cdot \vartheta воз}{Vгго \cdot Сгор} = \dfrac{0{,}806 + 3{,}86 \cdot 1{,}32 \cdot 10^3 \cdot 293}{1{,}36 \cdot 10^3 \cdot 5{,}298} = 187{,}1К$

2) $Ta_2 = \dfrac{0{,}884 + 3{,}42 \cdot 1{,}32 \cdot 10^3 \cdot 293}{7{,}36} = 179{,}8К$

3) $Ta_3 = \dfrac{1{,}011 + 3{,}09 \cdot 1{,}32 \cdot 293}{7{,}36} = 162{,}5К$

Действительный объем продуктов сгорания:

$V_{\text{ѿр}} = V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V^0 = 5{,}298 м^3/м^3)$

$V_{N_2^0} = 0{,}79 \cdot V^0 + 0{,}01N_2 = 2{,}76 м^3/м^3$-теоретический объем азота.

$V_{RO_2} = 0{,}01(CO_2 + CO + N_2S + \sum mCmHm) = 1{,}34 м^3/м^3$ -объем трех атомных газов.

$V_{H_2^0O} = 0{,}01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} CmHm + 0{,}0124 \cdot d) + 0{,}0161V^0 = 0{,}57 м^3/м^3$ - теоретический объем водяных паров.

Концентрация метана в смеси (при сжигании 1 $м^3$ метана)

$C_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V}$; $V = 1 + Vq$ -общий расход.

1) $C_{CH_4} = \frac{1}{1 + 3{,}56} = 0{,}219$

2) $C_{CH_4} = \frac{1}{1 + 3{,}42} = 0{,}226$

3) $C_{CH_4} = \frac{1}{1 + 3{,}09} = 0{,}244$

Температуропроводность смесей:

$a_{см} = a_{CH_4} \cdot c_{CH_4} + a_B c_b$, $(a = 7{,}76 м^{10^{-5}}/с = \frac{\alpha}{c\rho \cdot \rho})$.

1) $a_{см} = 2{,}18 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}741 + 7{,}76 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}219 =$
$= 1{,}61538 + 1{,}69944 = 3{,}31 \cdot 10^{-5} м^2/с$

2) $a_{см_2} = 1{,}61538 + 1{,}75376 = 3{,}36 \cdot 10^{-5} м^2/с$

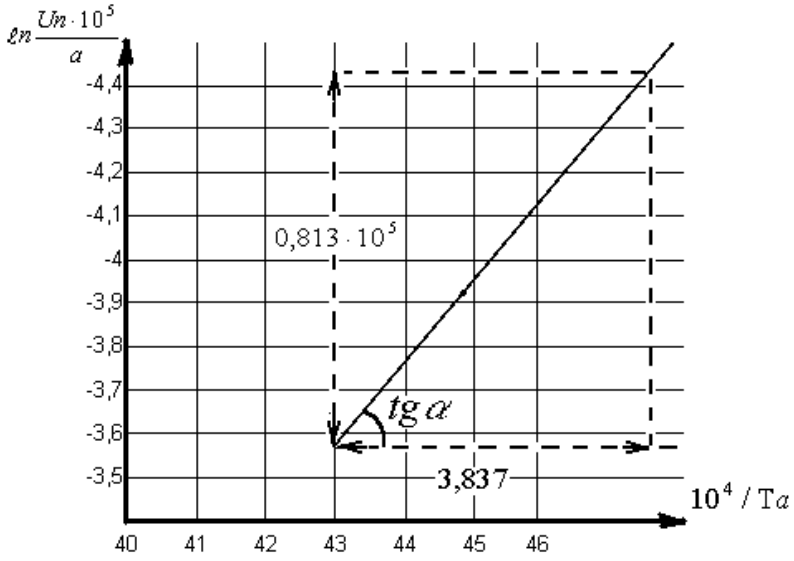
3) $a_{см_2} = 3{,}50 \cdot 10^{-5} м^2/с$

Вспомогательные величины (для графика).

$\ell n\left(\frac{U_{H_1^2}}{a_1}\right) = 8{,}71$ $\quad 10^4/Ta_1 = 53{,}44$

$\ell n\left(\frac{U_{H_2^2}}{a_2}\right) = 9{,}21$ $\quad 10^4/Ta_2 = 55{,}61$

$\ell n\left(\frac{U_{H_3^2}}{a_3}\right) = 8{,}83$ $\quad 10^4/Ta_3 = 61{,}53$



$B = tg\alpha = 0{,}002$

Уравнение прямой : $\ln = (u_H^2 / a) = \ln A - 10^4 B / T_a$

$u_H^2 / a = 5{,}35 \cdot 10^{-2} \theta_0^5 \exp[-1{,}5E / RT_a)]$ -формула Пекле.

$c = 5{,}35 \cdot 10^{-2} \theta_0^5;$

$\ln(u_H^2 / a) = \ln(c\kappa_0) - 1{,}5E/(RT_a)$

$$E = \frac{10^4 RB}{1{,}5}; \quad E = 110{,}8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$\kappa_0 = A / c$; $\kappa_0 = 2{,}09 \cdot 10^6 1/c$

Рекомендуемая литература

1.Андросов А.С. Примеры и задачи по курсу. Теория горения и взрыва. Учебное пособие./ А.С. Андросов, Е.П Салеев. - М.: Arfltvbz ГПС МЧС России, 2007 – 237с.

2.Андросов А.С. Примеры и задачи по курсу. Теория горения и взрыва. Учебное пособие./ А.С. Андросов, Е.П Салеев. - М.: Arfltvbz ГПС МЧС России, 2005. - 86 с.

3.Белоусов В.Н. Топливо и теория горения. Часть II. Теория горения Учебное пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова— СПб., СПбГТУРП.2011. – 142 с.

4.Вершинин Н.Н. Теория горения и взрыва: учеб. пособие / Н. Н. Вершинин, Г. В. Козлов, Ю. А. Григорьев. –Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. – 156 с.

5. Теория горения и взрыва Учебник и практикум / под общ. ред. А.В. Тотая, О.Г. Казакова. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт, 2013. - 295 с.

5.Козлов В.С. Теория и физика горения и взрыва: Учебное пособие /В.С. Козлов– Томск, Изд-во Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. 2008г. -78 с

6.Лопанов А.Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва. Учебное пособие./А.Н.Лопанов - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - 149 с.

7. Сазонов, В. Г. Основы теории горения и взрыва : учебное пособие / В. Г. Сазонов – Москва : Альтаир : МГАВТ, 2012. – 169 с. – Режим доступа: URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=430048

8. Колпакова Н.В. Газоснабжение/ Н.В. Колпакова, А.С. Колпаков– Издательство Уральского университета, 2014. - 201с.– : Режим доступа: URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275734

9. Ассад М.С. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент/ М.С. Ассад, О.Г. Пенязьков– Минск

:Белорусская наука, 2010. -305 с. Режим доступа: URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=142285

10. Шалай В.В. Расчет тепловых процессов и установок в примерах и задачах : практикум/ В.В.Шалай и др.– Омск : Издательство ОмГТУ, 2015. - 120 с.– Режим доступа: URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=443145

Учебное издание

Демченко Мария Станиславовна
кандидат технических наук, доцент

Токарева Анна Николаевна
кандидат технических наук, доцент

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Объем ЭИ: 0,76 Мб
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF)

На титульную страницу