



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика»

Расчет параметров горения и взрыва

«Теория горения и взрыва»

Авторы:

Коволенко Ю.В

Романов В.В.

Бабенков Ю.В.

Озерский А.И.

Тихомиров А.Г.

Ростов-на-Дону, 2012



Аннотация

Учебное пособие представляет собой руководство по выполнению практических работ в курсе «Теория горения и взрыва».

Дается краткое изложение основных теоретических положений, касающихся горения и взрыва органических топлив. Дана характеристика органических топлив, сжигаемых в топках печей и котлов, рассмотрены физико-химические процессы при горении топлив и топочные устройства.

Учебное пособие предназначено для студентов 3-го, 4-го курсов специальностей всех форм обучения

Составители: канд. техн. наук, доц. Ю.В. Коваленко
канд. техн. наук, доц. В.В. Романов
канд. техн. наук, доц. Ю.И. Бабенков
канд. техн. наук, доц. А.И. Озерский
канд. техн. наук, доц. А.Г. Тихомиров





Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ	6
1.1.Классификация топлив	6
1.2. Состав топлива	8
1.3. Виды исходной массы топлива.....	9
1.4. Теплота сгорания топлива	10
1.5. Условное топливо. Приведенные характеристики топлива	11
1.6. Объем воздуха и продуктов сгорания при.....	13
1.7. Уравнение теплового баланса	16
1.8. Адиабатная температура горения	18
1.9. Маркировка каменных углей.....	18
1.10. Жидкое топливо.....	21
1.11. Газообразное топливо	23
1.12. Искусственные газы	25
1.13. Природные газы. Газовые месторождения	27
1.14. Расчет параметров горения топлива	29
Глава 2. Расчет параметров взрыва	35
2.1. Основные положения	35
2.2. Расчет параметров взрыва газо-воздушных смесей	38
Приложение.....	44
Литература.....	55



ВВЕДЕНИЕ

Источником тепловой и электрической энергии на ТЭЦ служит органическое топливо твердое, жидкое, газообразное, сжигаемое в парогенераторах и водогрейных котлах.

С точки зрения экономических показателей наивыгоднейшим топливом является природный газ. Высокая теплотворная способность ($Q_n \approx 35,6$ МДж/м³), легкость транспортировки, отсутствие необходимости в подготовке к сжиганию и сравнительная простота автоматизации топочных процессов определяют высокие технико-экономические показатели ТЭЦ и котельных, работающих на газе. Газообразное топливо очень выгодно отличается от других видов топлива также отсутствием в его составе серы и золы, не загрязняет воздушный бассейн. Это позволяет сооружать крупные ТЭЦ в больших городах, чем обеспечивается высокая экономичность теплоснабжения. Практическое отсутствие в природном газе влаги, его высокая реакционная способность обеспечивают газовым котлам более высокую экономичность по сравнению с котлами, работающими на жидком и твердом топливе.

В качестве жидкого топлива в промышленной энергетике используется мазут – остаточный продукт переработки нефти. Мазут – также высококалорийный вид топлива ($Q_n^p \approx 40,5$ кДж/кг), хотя и не обладающий всеми преимуществами природного газа. Продукты переработки нефти, используемые в энергетике, как правило, содержат много парафина и серы (до 3 % и более). Сжигание жидкого топлива требует предварительной подготовки – разогрева, сооружения оборотных систем циркуляции, специальных устройств для слива и хранения. Сжигание мазутов хотя и высокоэффективно, однако сопряжено с некоторыми трудностями, к которым в первую очередь надо отнести загрязнение липкими очаговыми остатками поверхностей нагрева котлов и повышенную сернистую коррозию хвостовых поверхностей нагрева. Для обеспечения длительной нормальной работы котлов на мазуте их оснащают специальными очистительными устройствами – дробеочистками, водообмывками. Во избежание разрушающего действия сернистой коррозии приходится усложнять котельные агрегаты устройствами для предварительного подогрева воздуха с целью повышения температуры металла хвостовых секций воздухоподогревателей выше точки росы уходящих газов, которая при наличии в топливе серы резко повышается. Котельные, сжигающие сернистые мазуты, требуют соору-



Теория горения и взрыва

жения высоких, дорогих труб для отвода в атмосферу уходящих продуктов сгорания. Все это приводит к удорожанию ТЭЦ и котельных на мазуте, снижает их экономические показатели по сравнению с установками, работающими на газе.

Характеристики твердых топлив изменяются в широких пределах (для низкокалорийного топлива $Q_H^p = 9,76$ МДж/кг, для высококалорийного $Q_H^p = 28,4$ МДж/кг). Изменение калорийности твердого топлива в основном зависит от содержания в нем золы и влаги. В твердом топливе в значительных количествах часто имеются также сернистые соединения. Использование твердого топлива сопряжено с большими трудностями по сравнению с газообразным и жидким топливами и обходится значительно дороже. Балласт в твердом топливе резко увеличивает стоимость перевозок его. Прием и хранение запасов угля, внутренний транспорт и подготовка его к сжиганию (дробление, размол) организация процесса сжигания – все это намного сложнее и дороже, чем при сжигании газа или мазута. Необходимость удаления очаговых остатков шлака и золы, сооружение золоулавливающих установок, сооружение шлакоотвалов также удорожают установки, работающие на твердом топливе. Даже крупные современные парогенераторы, работающие на угле, имеют КПД на 2-3 % ниже КПД газомазутных котлоагрегатов.

Однако качественные показатели и преимущества газомазутных топлив перед твердыми не могут служить определяющим фактором при выборе вида топлива проектируемого теплоисточника. Решающим фактором является запас того или иного вида топлива в стране. Так как запасы твердого топлива в РФ значительно превосходят запасы газового топлива (по теплу), а потребность страны в топливе столь велика, что топливная промышленность с трудом успевает покрывать ее, то выбор топлива в основном зависит от наличия свободных топливных резервов, использование которых для данного теплоисточника экономически может быть оправдано.

ТЭЦ и котельные металлургических заводов частично используют в качестве топлива отходы доменного и коксового производств. Доменный и коксовый газы – топлива низкокалорийные $Q_H^p \approx 4,2$ МДж/м³ и $Q_H^p \approx 14,65$ МДж/м³ соответственно. Однако сжигание их в топках котлов всегда оправдывается, так как при этом используется значительное количество тепла, которое другого применения не имеет.



1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

1.1. Классификация топлив

Понятие «топливо» объединяет вещества, выделяющие (в результате тех или иных преобразований) энергию, которая может быть технически использована. В настоящее время известны две группы топлив, различающиеся по принципу высвобождения энергии:

- 1) ядерное, выделяющее энергию в результате ядерных преобразований;
- 2) органическое, выделяющее энергию при окислении горючих элементов.

Основным источником энергии, различного рода энергетических установках и двигателях, является органическое топливо (в ракетной технике под термином «топливо» понимается совокупность горючего и окислителя).

Высвобождение химической энергии органического топлива осуществляется в процессе его сжигания (горения). Горение - это комплекс быстро протекающих химических реакций, сопровождающихся выделением теплоты. Для энергетических целей используются реакции окисления органической массы природных топлив (или их производных) кислородом воздуха (реже в воздухе, обогащенном кислородом).

В настоящее время добывается большое количество разнообразных природных топлив; много топлив получается искусственным путем, в результате технологической переработки природных топлив. Топлива различаются по физическим свойствам и химической структуре, что влияет на процесс горения, Поэтому знание структуры и физико-химических характеристик топлив является необходимой основой расчетов процесса горения.

В технике используются следующие органические топлива:

- 1) твердое (древесина, торф, угли (бурый, каменный, антрацит)), сланец, продукты переработки твердого топлива – кокс и полукокс);
- 2) жидкое (нефть, продукты нефтепереработки – бензин, керосин, дизельное и газотурбинное топливо, мазут, топливо печное бытовое (ТПБ));
- 3) природный горючий газ, газы термообработки и коксования – генераторные, доменные, коксовальных печей.

Твердые топлива образовались в результате геологического старения растительных организмов (древесных пород, мхов и др.) и планктонных образований. По склонности к естественному распаду



Теория горения и взрыва

различные составляющие растительных организмов можно разбить на 2 группы: 1) целлюлозы, гемицеллюлозы и белки легко поддающиеся разложению; 2) лигнин, воски, смолы и углеводороды трудно поддающиеся или вообще не поддающиеся разложению в течение нескольких геологических периодов.

При углеобразовании отмершие клетки растительных организмов, лишенные протоплазмы и ядра, в основном содержат целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин с некоторым включением смол, восков, жиров и других веществ. Целлюлозы и гемицеллюлозы представляют собой полимерные углеводороды с эмпирической формулой $(C_6H_{10}O_5)_n$ или $(C_6H_8O_4)_n$. Элементарный состав лигнина колеблется в широких пределах: углерода 62–69 %, водорода 4,5–6,6 %; остальную часть составляет кислород.

В процессе геологического старения, составляющие первой группы превращаются в газообразные или легко растворимые вещества и практически не участвуют в углеобразовании. Вещества второй группы со временем полимеризуются, уплотняются, превращаются в еще более устойчивые. Они в основном определяют состав ископаемых твердых топлив. Переход от растительных остатков к торфу, а затем к бурым и каменным углям характеризуется повышением в их органической массе содержания углерода и понижением содержания кислорода.

Нефть и природные горючие газы, как и твердые топлива, образуются путем длительного преобразования органических остатков, включенных в горные породы. Основную массу нефти составляют предельные, непредельные и ароматические углеводороды. Природные горючие газы также отличаются повышенным содержанием углеводородов предельного ряда (CH_4 , до 90 %).

Сырая нефть является ценным химическим сырьем, как топливо непосредственно не применяется. В результате ее переработки помимо товарных продуктов получают топлива (бензин, керосин и др.), не содержащие минеральных примесей и отличающиеся высокой реакционной способностью. Остаточным продуктом нефтепереработки является мазут. Количество и качество мазута зависят от вида нефти и от технологии ее переработки. Топочный мазут отличается повышенным содержанием серы и золы и высокой вязкостью, что заметно усложняет его сжигание.

Искусственные горючие газы получают либо специально (генераторные газы), либо попутно при различных технологических процессах (газы коксовальных печей, доменные газы, попутные газы нефтедобычи и др.). Состав этих газов разнообразен и зависит от способа их получения; как правило, они содержат значительные количества N_2 , O_2 и CO_2 , что обуславливает достаточно низкую их теплоту



сгорания. В энергетических целях искусственные газы используются редко.

1.2. Состав топлива

Для твердого и жидкого топлива состав выражается не соединениями, а содержанием отдельных элементов (%) к исходной массе топлива.

Газообразное топливо представляет собой смесь различных газов, которые легко определяются газовым анализом. Поэтому состав газообразного топлива обычно выражается объемными долями отдельных газов (CH_4 , C_mH_n , CO , CO_2 , H_2 , N_2 , O_2 , H_2O и др.) в процентах к объему сухого газа при нормальных условиях.

Горючие элементы – С, Н и S.

Внутренний балласт – O_2 и N_2 .

Внешний балласт – зола и H_2O .

Главный горючий элемент – углерод (всего в топливе до 85%).

Сера входит в топливо в виде:

$S_{\text{кр}}$ – органическая, в составе органических веществ;

$S_{\text{п}}$ – пиритная, в составе FeS_2 и CuFeS_2 ;

$S_{\text{суль}}$ – сульфатная в виде CaSO_4 , MgSO_4 , FeSO_4 и др.

Органическая и пиритная сера горят и составляют летучую серу $S_{\text{л}}$. Сульфатная сера переходит в золу.

Кислород и азот в топливе находятся в связанном состоянии в виде органических соединений. В состав топлива также входят минеральные примеси в виде оксидов Si, Fe, Al сульфатов и других соединений.

Технической характеристикой содержания влаги в топливе является влажность W . Она определяется по изменению массы топлива путем его высушивания при $t = 102 - 105$ оС и выражается в процентах от начальной массы навески топлива.

Технической характеристикой минеральных примесей является зольность топлива A , представляющая собой долю негорючего остатка (%).



1.3. Виды исходной массы топлива

Топливо в естественном состоянии называется рабочим, а составляющее его вещество – рабочей массой.

$$C^P + H^P + S_a^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100\%$$

Расчет процессов горения производят на рабочую массу.

Влажность и зольность твердого топлива сильно колеблются, поэтому часто используют сухой состав массы топлива

$$C^C + H^C + S_a^C + O^C + N^C + A^C = 100\%$$

или сухой беззольный, т.е. горючий состав топлива

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

В горючий состав входит балласт в виде N r и O r. Иногда в состав топлива включается только органическая масса топлива (исключается пиритная сера). В этом случае

$$C^O + H^O + S_{op}^O + O^O + N^O = 100\%$$

При заданной влажности и зольности рабочей массы определение остальных ее составляющих по известному составу горючей массы производят по формуле

$$X^P = X^r \frac{100 - W^P - A^P}{100} \quad (1)$$

где X P и X r – рабочая и горючая массы топлива (%).

Если зольность дается на сухую массу A, то зольность рабочей массы

$$A^P = A^C \frac{100 - W^P}{100} \quad (2)$$



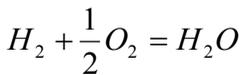
1.4. Теплота сгорания топлива

Удельной теплотой сгорания называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества топлива. При полном сгорании в продуктах реакции присутствуют лишь CO_2 , H_2O и O_2 .

Удельную теплоту сгорания относят к 1 кг или к 1 м³ (для газообразных топлив при нормальных условиях: $t = 0$ оС и давление $p=0,1013$ МПа).

Теплота сгорания может относиться к рабочей Q_R , сухой Q_C , сухой беззольной Q_g , к органической Q_0 массам топлива.

Различают высшую и низшую теплоту сгорания. Высшая – с учетом теплоты конденсации водяного пара. Низшая – без теплоты конденсации водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания топлива. Масса водяного пара складывается из влаги топлива и водяного пара, полученного при горении водорода



При протекании этой реакции массовое количество водяного пара в 9 раз больше количества израсходованного водорода. Удельную теплоту конденсации водяного пара с учетом теплоты охлаждения

конденсата округленно принимают равной $2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Таким образом

$$Q_H^P = Q_B^P - 25(W^P + 9H^P), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (3)$$

где Q_H^P , Q_B^P – низшая и высшая теплота сгорания соответственно.

Низшую теплоту сгорания твердого и жидкого топлива можно рассчитать по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S_a^P) - 25W^P, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (4)$$

Эта формула не пригодна для расчета теплоты сгорания торфа и сланцев.

Удельная теплота сгорания газообразного топлива может быть



подсчитана по следующей формуле

$$Q_H^P = 127,6CO + 108,1H_2 + 359,8CH_4 + 599,1C_2H_4 + 231,3H_2S, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (5)$$

где CO, H₂ - объемная доля (%).

1.5. Условное топливо. Приведенные характеристики топлива

Расход топлива на ТГУ зависит от его теплоты сгорания и эффективности работы оборудования. Для сравнения по энергетической ценности и эффективности использования различных топлив введено понятие условное топливо, которому присваивается теплота сгорания, равная $Q_{\text{усл}} = 29,3$ МДж/кг (7000 ккал/кг).

Пересчет расхода B действительного топлива в условное $B_{\text{усл}}$ производят по формуле

$$B_{\text{усл}} = \frac{B \cdot Q_H^P}{Q_{\text{усл}}}, \quad (6)$$

которую получают из условия постоянства тепловой мощности установки.

$$B_{\text{усл}} \cdot Q_{\text{усл}} = B \cdot Q_H^P. \quad (7)$$

Понятием условного топлива пользуются также при планировании добычи и потребления топлив.

Приведенные характеристики топлива

С увеличением внешнего балласта теплота сгорания топлива уменьшается. Для сравнения качеств различных топлив вводят их приведенные характеристики, отражающие содержание влаги, золы и серы в топливе, отнесенные к низшей теплоте сгорания его рабочей массы. Приведенные влажность $W^п$, зольность $A^п$ и сернистость $S^п$ топлива равны, (% кг/МДж)



Теория горения и взрыва

$$W^{\Pi} = \frac{W^P}{Q_H^P}; \quad (8)$$

$$A^{\Pi} = \frac{A^P}{Q_H^P}; \quad (9)$$

$$S^{\Pi} = \frac{S^P}{Q_H^P}. \quad (10)$$

Приведенные характеристики W^{Π} , A^{Π} и S^{Π} показывают, сколько на 1 МДж (Мкал) Q_H^P приходится влаги, золы и серы в процентах от рабочей массы топлива.

Топлива с $W^{\Pi} < 0,7$ % кг/МДж считаются маловлажными (антрацит и каменные угли); с $W^{\Pi} = 0,7 \div 1,89$ кг/МДж – средней влажности (бурые угли, сланцы); $W^{\Pi} = 1,89 \div 6,0$ кг/МДж – высоковлажными (бурые угли, фрезерный торф).

Топлива с $A^{\Pi} \leq 1$ % кг/МДж считаются малозольными (антрацит, большинство каменных и некоторые бурые угли). Большая часть бурых углей имеет $A^{\Pi} = 1,89 \div 2,4$ % кг/МДж, у горючих сланцев $A^{\Pi} = 5 \div 10$ % кг/МДж.

Например: а) Подмосковный уголь – $W^P = 32$ %; $Q_H^P = 10,43$ МДж/кг.

$W^{\Pi} = 32 / 10,43 = 3,06$ % кг/МДж;

б) Антрацитовый штыб - $W^P = 8,5$ %; $Q_H^P = 22,58$ МДж/кг.

$W^{\Pi} = 8,5 / 22,58 = 0,376$ % кг/МДж.

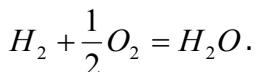
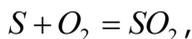
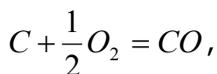
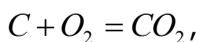
Следовательно, в соизмеримых единицах влажность подмосковного угля в 8,14 раза больше ($3,06/0,376 = 8,14$), чем антрацитового штыба.



1.6. Объем воздуха и продуктов сгорания при сжигании топлива

Материальный баланс процесса горения выражает количественные соотношения между исходными веществами и конечными продуктами, а тепловой баланс – равенство прихода и расхода теплоты. Для твердого и жидкого топлива материальный и тепловой балансы составляют на 1 кг топлива, а для газообразного – на 1 м³ сухого газа при нормальных условиях.

Уравнения горения твердого и жидкого топлива:



Количество воздуха, теоретически необходимое для полного сжигания 1 кг топлива, составляет

$$V^O = 0,0889(C^P + 0,375S_n^P) + 0,265H^P - 0,033 \cdot O^P.$$

Объемы CO₂ и SO₂ принято объединять, т.е.

$$RO_2 = CO_2 + SO_2.$$

Объем трехатомных газов в продуктах сгорания

$$V_{RO_2}^O = 0,01866(C^P + 0,375S_n^P). \quad (11)$$

Объем азота

$$V_{N_2}^O = 0,79V^O + 0,08N^P.$$

Объем водяного пара

$$V_{H_2O}^O = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^O. \quad (12)$$

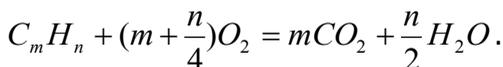
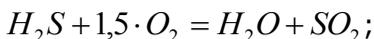
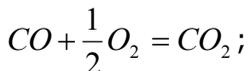
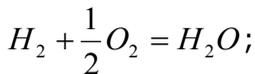
Суммарный теоретический объем продуктов сгорания



Теория горения и взрыва

$$V_r^O = V_{RO_2}^O + V_{N_2}^O + V_{H_2O}^O. \quad (13)$$

При сжигании газообразного топлива протекают следующие реакции:



Объем каждого горючего компонента в 1 м³ газового топлива можно выразить через его содержание в процентах. Тогда, пользуясь стехиометрическими коэффициентами в реакциях горения, можно получить формулы для определения теоретического объема кислорода и конечных продуктов при горении газового топлива.

Теоретически необходимый объем воздуха для сжигания 1 м³ газового топлива определяется следующим образом

$$V^O = 0,0476 \left[0,5CO^T + 0,5H_2^T + 1,5H_2S^T + \sum (m + \frac{n}{2})C_m H_n^T - O_2^T \right], \frac{M^3}{M^3} \quad (14)$$

где $CO^T, H_2^T, H_2S^T, C_m H_n^T$ - содержание отдельных газов (в %).

Теоретический объем продуктов сгорания газового топлива

$\left(\frac{M^3}{M^3} \right)$ определяется по следующим формулам

$$V_{RO_2}^O = 0,01(CO_2^T + CO^T + H_2S^T + \sum C_m H_n^T), \quad (15)$$

$$V_{N_2}^O = 0,79V^O + 0,01N_2^T, \quad (16)$$

$$V_{H_2O}^O = 0,01(H_2^T + H_2S^T + \sum 0,5nC_m H_n + 0,124\alpha_{ТЛ} + 0,0161V_O), \quad (17)$$

где $\alpha_{ТЛ}$ – влагосодержание топлива, отнесенное к 1 м³ сухого газа,

$\frac{2}{M^3}$. Отношение действительного объема воздуха V к теорети-



Теория горения и взрыва

чески необходимому при $t = 10^{\circ}C$ принимают $\alpha_{ТЛ} = 10 \frac{z}{M^3}$. V^0 называется коэффициентом избытка воздуха

$$V = \alpha V^0. \tag{18}$$

Действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического за счет азота, кислорода и водяного пара, который содержится в избыточном воздухе.

Объем трехатомных газов

$$V_{RO_2} = V_{RO_2}^O. \tag{19}$$

Объем двухатомных газов

$$V_{R_2} = V_{N_2}^O + (\alpha - 1)V^O. \tag{20}$$

Объем водяного пара

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha - 1)V^O. \tag{21}$$

Суммарный объем продуктов сгорания при $\alpha > 1$ ($\frac{M^3}{KZ}$ или $\frac{M^3}{M^3}$) будет

$$V_r = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O}. \tag{22}$$

При сжигании твердых топлив концентрация золы в дымовых газах ($\frac{z}{M^3}$) определяется по формуле

$$\mu = 10A^P \cdot a_{vH} \cdot \frac{1}{V_r}, \tag{23}$$

где a_{vH} – доля золы, уносимая газами; принимается по техническим характеристикам топок.

Объемные доли трехатомных газов

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_r}; \quad r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r}. \tag{24}$$



1.7. Уравнение теплового баланса

Для установившегося теплового состояния тепловой баланс процесса горения твердого и жидкого топлива можно выразить следующим уравнением:

$$Q_H^P + i_{\phi T} + J_B = Q_{\text{пол}} + \sum Q_{\text{пот}} + J_r, \quad (25)$$

где Q_H^P – низшая теплота сгорания, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$i_{\phi T}$ – энтальпия топлива (физическая теплота);

J_B – энтальпия воздуха;

$Q_{\text{пол}}$ – полезно используемая теплота;

$\sum Q_{\text{пот}}$ – сумма потерь теплоты в процессе горения;

J_r – энтальпия отходящих газов;

Если сжигается газообразное топливо, то вместо Q_H^P подставляется $Q_H^C \left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right)$. Часто распыл мазута осуществляется при использовании водяного пара. В этом случае необходимо вводить поправки в уравнения (12) и (25).

$$\text{Сумму } Q_H^P + i_{\phi T} = Q_P^P \quad (26)$$

называют располагаемой теплотой топлива.

$$\text{Энтальпия топлива } i_{\phi T} = C_T t_T, \quad (27)$$

где C_T – удельная теплоемкость топлива; t_T – температура топлива.

$$\text{Энтальпия воздуха } J_B = \alpha J_B^O. \quad (28)$$

$$\text{Энтальпия продуктов сгорания } J_r = J_r^O + (\alpha - 1) J_B^O. \quad (29)$$



Теория горения и взрыва

Здесь J_B^O и J_r^O - энтальпии теоретического количества воздуха и продуктов сгорания соответственно в $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ или $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$.

$$J_B^O = V^O i_B, \tag{30}$$

$$J_r^O = V_{RO_2}^O i_{RO_2} + V_{N_2}^O i_{N_2} + V_{H_2O}^O i_{H_2O}, \tag{31}$$

где i_B - удельная энтальпия воздуха при температуре подачи в топку;

$i_{RO_2}, i_{N_2}, i_{H_2O}$ - то же при температуре выхода газов из топки.

Если приведенная величина уноса золы из топки

$$\frac{A^P \cdot a_{vH}}{Q_H^P} > 1.5\%, \frac{\text{кг}}{\text{МДж}},$$

то к энтальпии дымовых газов следует добавить энтальпию золы, определяемую по формуле:

$$J_3 = \frac{A^P}{100} \cdot a_{vH} \cdot i_3, \tag{32}$$

где i_3 – удельная энтальпия золы, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Потери теплоты определяются по уравнению

$$\Sigma Q_{\text{пот}} = Q_{\text{хим}} + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{дис}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{фшл}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \tag{33}$$

Здесь $Q_{\text{хим}}$ – потери теплоты от химической неполноты сгорания;

$Q_{\text{мех}}$ – потери теплоты от механической неполноты сгорания;

$Q_{\text{дис}}$ – потери теплоты от диссоциации продуктов сгорания;

$Q_{\text{охл}}$ – потери теплоты в окружающую среду от наружного охлаждения;

$Q_{\text{фшл}}$ – потери теплоты с физической теплотой шлаков.

Потери теплоты от диссоциации продуктов сгорания учитываются только в высокотемпературных огнетехнических установках.



1.8. Адиабатная температура горения

При реальном горении в адиабатных условиях количество теплоты, выделяемое в топке в расчете на 1 кг (или 1 м³) действительно сгоревшего топлива, называется полезным тепловыделением

$$Q_T = Q_P \frac{100 - (q_{ХИМ} + q_{МЕХ} + q_{ФШТ} + q_{ДИС})}{100 - q_{МЕХ}} + J_B, \quad (34)$$

где $q_{ХИМ}$, $q_{МЕХ}$, $q_{ФШТ}$, $q_{ДИС}$ - потери теплоты (%);

$(100 - q_{МЕХ})$ - количество топлива, действительно принявшего участие в горении (%).

В адиабатном процессе полезное тепловыделение в топке затрачивается на нагрев продуктов сгорания до температуры, называемой адиабатной или теоретической температурой горения

$$T_a = \frac{Q_T}{V_r C_{CP}}, \quad (35)$$

где C_{CP} – средняя теплоемкость продуктов сгорания, зависящая от T_a . Задача по нахождению T_a решается методом последовательных приближений.

1.9. Маркировка каменных углей

Ископаемые твердые топлива разделяются на угли, горючие сланцы и торф. Жидким топливом, в основном, является мазут. Из газообразных топлив в ряде районов как основное, а в остальных случаях как замещающее топливо электростанций используется природный газ.

В зависимости от теплоты сгорания влажной беззольной массы топлива и выхода летучих веществ угли разделяются на четыре типа: бурые, каменные, полуантрациты и антрациты.

1) Бурые угли по содержанию влаги в рабочей массе топлива разделяются на три группы: Б1, Б2, Б3 при содержании W соответственно более 40, 30-40 % и менее 30 %.



Теория горения и взрыва

2) Каменные угли отличаются более глубокой углефикацией исходного органического вещества и имеют в связи с этим более высокую теплоту сгорания. В зависимости от выхода летучих веществ, свойства спекаемости органической массы угля при высоких температурах и наличия жирных смолистых веществ в исходном топливе, каменные угли разделяются на несколько марок (табл. 1.3).

Маркировка каменных углей

Таблица 1.3

Марка угля	Обозначение	Выход летучих веществ на горючую массу, V^r , %	Марка угля	Обозначение	Выход летучих веществ на горючую массу, V^r , %
Длинно-пламенный	Д	>35	Коксовый второй	К2	17-25
Газовый	Г	>35	Слабоспекающийся	СС	25-37
Газовый жирный	ГЖ	27-37	Отощенный спекающийся	ОС	14-22
Жирный	Ж	27-37			
Коксовый жирный	КЖ	25-31	Тощий	Т	8-17
Коксовый	К	18-27			

Угли со спекающимся коксом используются в доменном производстве. Они предварительно обогащаются (отделяется минеральная часть вместе с угольной мелочью). Обогащенный угольный концентрат направляется на коксование, а отделенные мелкие фракции топлива с повышенной зольностью ($A^c > 40\%$) сжигаются на электростанциях. Их



Теория горения и взрыва

называют промежуточным продуктом обогащения.

Применяют так называемые «мокрый» и «сухой» способы обогащения топлива. В первом случае промежуточный продукт обогащения называется шламом, во втором – отсевом.

3) К антрацитам (обозначение – А) относят угли с наиболее высокой степенью углефикации и низким выходом летучих веществ – менее 9 %

4) К полуантрацитам (обозначение – ПА) относят угли, переходные от каменных углей к антрацитам. Ископаемые угли по крупности кусков при сортировке разделяются на классы (табл. 1.4).

На электростанцию поступает топливо разной крупности (см. табл. 1.4), представляющее собой смесь нескольких классов, например СШ – «семечко со штыбом», то есть уголь размером фракций (кусков) от 13 мм и менее, МСШ – угольная мелочь размером фракций менее 25 мм.

Классификация углей по размеру кусков (ГОСТ 19242-73)

Таблица 1.4

Класс	Условное обозначение	Размер кусков, мм
Плитный	П	Более 100
Крупный	К	50 - 100
Орех	О	25 - 50
Мелкий	м	13 - 25
Семечко	с	6 - 13
Штыб	ш	Менее 6
Рядовой	Р	0 - 200

К твёрдым топливам относят также горючие сланцы, представляющие собой минеральные породы, пропитанные горючими органическими веществами. Горючие сланцы в минеральной части содержат заметное количество карбонатов, разлагающихся при высокой температуре с выделением



диоксида углерода. Поэтому кроме зольности горючих сланцев ($A^P = 40 \div 45$ %) отдельно указывается выделение диоксида углерода в процентах от рабочей массы ($CO_2^K = 14 \div 15$ %). Разложение карбонатов происходит с затратой теплоты, в связи с чем указанная в таблицах теплота сгорания 1 кг рабочей массы сланцев, МДж/кг, должна быть снижена.

Изменение состава рабочей массы по сравнению со средним, приведенным в таблицах, чаще всего связано с отклонениями зольности и влажности добываемых твердых топлив от расчетных значений. В этом случае изменяется теплота сгорания топлива и связанные с ней объемы и энтальпии образующихся газов и расход воздуха на сжигание топлива. Изменение состава топлива, поступающего к горелкам парового котла, может быть также связано с сжиганием предварительно подсушенного топлива (сушонки) при использовании разомкнутой или полуразомкнутой схемы пылеприготовления. В указанных случаях вначале определяют новое значение теплоты сгорания топлива, а затем производят расчет теоретических объемов и энтальпий.

1.10. Жидкое топливо

Жидкое топливо, используемое в энергетике, получают из нефти методами ее термохимического разложения. Нефть – смесь жидких органических соединений, состоит из углеводородов трех классов:

- а) метановые углеводороды C_nH_{2n+2} : метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и др.;
- б) нафтеновые углеводороды – циклопентан C_5H_{10} , циклогексан C_6H_{12} и др.;
- в) ароматические углеводороды – бензол C_6H_6 , толуол C_7H_8 ,

Теплота сгорания нефти мало меняется от состава ее органической массы $C^r = 83-87$ %, $Q_H^P = 43 - 46$ МДж/кг. Кислород (O), азот (N) и сера (S) в нефти находятся в составе высокомолекулярных органических соединений. Нефть содержит не более 0,3 % минеральных примесей и свыше 2,0 % воды в виде механических включений. Температура кипения фракций нефти от 30 до 600 °С.

Нефтепродукты получают:

- 1) методом термической перегонки, при этом нефть разделяется на узкие фракции по температурам их кипения без разрушения молекулярной



структуры;

2) методом термического крекинга, при котором происходит глубокая переработка углеводородов с разрушением их молекулярной структуры и образованием новых соединений с меньшей молекулярной массой.

В зависимости от температуры перегонки нефтепродукты делят на фракции: бензиновые с температурой перегонки до $200 \div 225$, керосиновые – $140 \div 300$, дизельные – $190 \div 350$, соляровые – $300 \div 400$, мазутные - свыше 350 °С. Бензиновые, керосиновые, дизельные и соляровые фракции являются светлыми нефтепродуктами, называемыми дистиллятным топливом. Для бытового потребления выпускается топливо-печное бытовое ТПБ, получаемое из дистиллятных фракций нефтепродуктов. В котлах ТЭС и крупных отопительных котельных применяют мазут, а в меньших отопительных котельных и в бытовых теплогенераторах - топливо печное бытовое.

Физические свойства жидких топлив характеризуются:

1) Относительной плотностью ρ – отношение плотности нефтепродукта при температуре t_2 к плотности дистиллированной воды при температуре t_1 . Стандартными температурами приняты: $t_1=4$ °С; $t_2=20$ °С;

2) Условной вязкостью – отношение времени истечения 200 см^3 нефтепродукта при определенной температуре, к времени истечения этого же объема дистиллированной воды при температуре 20 °С;

3) Температурой вспышки при которой топливо, нагретое в строго определенных условиях, выделяет достаточное количество паров для того, чтобы смесь этих паров с окружающим воздухом могла вспыхнуть при поднесении к ней пламени.

4) Температурой застывания при которой нефтепродукт загустевает настолько, что при наклоне пробирки на 45° к горизонту его уровень остается неподвижным в течении 1 мин.

Мазуты делятся на флотские мазуты марки Ф5 и Ф12 (легкие топлива), топочные мазуты марок 40В и 40 (средние топлива), топочные мазуты марок 100В, 100 и 200 (тяжелые топлива). Флотский мазут используется в судовых котлах, газотурбинных установках и двигателях, его условная вязкость при температуре 50 °С не превышает 5 (мазут Ф-5) и 12 (мазут-12) УВ. Мазуты марок 40 и 40В используются в судовых котлах, промышленных печах, отопительных котельных и ТЭС; мазуты марок 100, 100В и 200 используют на крупных ТЭС и ТЭЦ.

Топочные мазуты по содержанию в них серы делятся на три группы: малосернистые ($S^r = 0,5$ %), сернистые ($S^r = 0,5-2,0$ %) и высокосернистые



(S^r более 2,0 %).

Зольность А мазутов не превышает $0,1 \div 0,3$ %, увеличиваясь с повышением его вязкости. В минеральных компонентах мазута содержится Fe_2O_3 от 3,0 до 10 % и V_2O_5 от 0 до 29 % (на массу золы). Содержание воды в мазуте колеблется в весьма широких пределах (от 0,5 до 5 % и выше), что связано с технологией его разогрева в процессе доставки и приемки у потребителя. При разогреве мазута острым паром его влажность может повыситься на $5 \div 10$ %. Теплота сгорания мазута Q_H^p зависит в основном от его влажности и составляет $39 \div 42$ МДж/кг. Мазуты являются жидкостями с высокой относительной плотностью, равной $0,98 \div 1,05$. Температура вспышки мазутов равна $80 \div 140$ °С, а температура застывания $(- 5) \div (+42)$ °С; условная вязкость, при температурах $50 \div 100$ °С, меняется от 5 до 16 °ВУ.

Топливо печное бытовое (ТПБ) имеет теплоту сгорания $Q^p=41,87$ МДж/кг и содержание серы от 0,5 до 1,2 %, содержание золы составляет не более 0,02 %, температура застывания не выше минус 15 °С и температура вспышки не ниже +42 °С. Топливо печное бытовое является маловязким топливом с условной вязкостью не более 1,15 °ВУ, что позволяет использовать его без предварительного подогрева.

Дизельное топливо имеет низшую теплоту сгорания $Q^p=42,5$ МДж/кг; выпускаются две марки дизельного топлива: ДТ и ДМ. Дизельное топливо марки ДТ имеет вязкость при 50 °С менее 5,0 °ВУ, температуру вспышки более 65 °С, температуру застывания менее -5 °С. Дизельное топливо марки ДМ характеризуется вязкостью при 50 °С, равной 20 °ВУ; температура вспышки составляет 85 °С, а температура застывания – 10 °С.

1.11. Газообразное топливо

Газообразное топливо (газ) – представляет смесь различных простых горючих и балластных газов. Горючие газы бывают искусственные и природные.

К искусственным относят газы, вырабатываемые на газовых заводах в процессе термической переработки твердых и жидких топлив, а также выделяющиеся в качестве вторичных продуктов некоторых производств, например в доменном процессе, при получении кокса, переработке нефти и др.

К природным относят газы: 1) добываемые из чисто газовых месторождений; 2) попутные нефтяные, выделяющиеся из добываемой нефти; 3) получаемые из газоконденсатных месторождений (состоят из смеси сухого газа с парами



Теория горения и взрыва

конденсата тяжелых углеводородов); 4) сжиженные углеводородные, извлекаемые из газов нефтяных и газоконденсатных месторождений.

Свойства газового топлива определяются свойствами отдельных горючих и негорючих газов, его составляющих, и примесей. Горючая часть состоит из углеводородов, водорода и окиси углерода. В негорючую часть входят углекислый газ, азот и кислород. К примесям относят сероводород, аммиак, цианистые соединения, водяные пары, нафталин, смолы, пыль и др. Негорючие газы и примеси являются балластом газового топлива, ухудшающим его теплофизические и эксплуатационные качества. Поэтому содержание их доводится до минимума в соответствии с ГОСТ 5542-50*.

Горючая часть

а) Углеводороды предельного ряда составляют основную горючую часть природных газов и имеют общую химическую формулу C_nH_{2n+2} . Первый в их ряду – метан (CH_4), последующие – этан (C_2H_6), пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} и др.

Предельные углеводороды характеризуются высокой теплотой сгорания, не имеют цвета и запаха, не токсичны, но оказывают слабое наркотическое действие при большой концентрации. При скоплениях в помещениях более 10 % по объему они способны вызвать удушье из-за недостатка O_2 . С увеличением молекулярной массы углеводородов повышаются их теплота сгорания, плотность и способность конденсации ($Q_H^{мет} = 39,86$;

$$Q_H^{этан} = 70,42; Q_H^{проп} = 101,74; Q_H^{бут} = 133,98 \text{ МДж/м}^3).$$

б) Непредельные углеводороды входят в значительных количествах в искусственные газы. Их общая химическая формула C_nH_{2n} . Первые три члена – этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 и бутилен C_4H_8 . По свойствам они сходны с предельными углеводородами.

в) Водород H_2 горючий газ без цвета, запаха и вкуса, не токсичен. В реакциях горения активен, присутствует во всех искусственных газах ($Q_H^{H_2} = 12,77 \text{ МДж/м}^3$).

г) Окись углерода CO – горючий газ без цвета, запаха и вкуса, тяжелее воздуха, токсичен. Образуется при неполном сгорании топлива, содержится в больших количествах в искусственных газах.

Негорючая часть

Углекислый газ CO_2 не имеет цвета и запаха, со слабым кисловатым вкусом, не токсичен, но при скоплениях в помещении способен вызвать



удушьё из-за недостатка O_2 . Химически инертен.

Азот N_2 – газ без цвета, запаха и вкуса, не горит и не поддерживает горение, не токсичен. При высоких температурах, например в топках, возможно образование окислов азота, являющихся высокотоксичными компонентами продуктов сгорания.

Кислород O_2 – газ без цвета, запаха и вкуса, не горит, но поддерживает горение. Содержится в небольших количествах в некоторых искусственных газах. В присутствии влаги активно способствует коррозии металла газопроводов и арматуры.

Примеси

Сероводород H_2S – бесцветный горючий газ с характерным запахом тухлых яиц. Может содержаться в искусственных и плохо очищенных природных газах. Как сам H_2S , так и продукт его сгорания – сернистый газ SO_2 – весьма токсичны и разрушают металлы, образуя с железом пиррофорные соединения, способные самовоспламеняться в воздухе.

Аммиак NH_3 – бесцветный газ с острым запахом нашатырного спирта, вредная токсичная примесь некоторых искусственных газов.

Цианистые соединения, в первую очередь синильная кислота HCN , могут образоваться в коксовых газах в результате взаимодействия углерода топлива с аммиаком. При нормальных условиях синильная кислота – бесцветная легкая жидкость с весьма высокими токсичными и коррозионными свойствами.

Пары воды могут содержаться в недостаточно осушенных газах. При высоких давлениях они образуют с тяжелыми углеводородами кристаллогидратные соединения, внешне напоминающие частички снега или льда, которые закупоривают газопроводы. Влага способствует коррозии металлов.

Нафталин, смолы и пыль, откладываясь на внутренних стенках газопроводов, уменьшают их сечения, а при плохой очистке газа – закупоривают отдельные участки газопроводов, преждевременно засоряют фильтры, арматуру и другие устройства.

1.12. Искусственные газы

По методу производства искусственные горючие газы подразделяют на две основные группы.

1) Газы высокотемпературной (до $1000\text{ }^\circ\text{C}$) и среднетемпературной (до $600\text{ }^\circ\text{C}$) перегонки твердых и жидких топлив (коксовый, сланцевый и газы



пиролиза нефти). Получают в термических печах и установках нагреванием твердого или жидкого топлива без доступа воздуха. При этом в процессе термического разложения горючей части исходных топлив помимо кокса, смолы, бензина, керосина и др., выделяются горючие газы. Так при переработке 1 т каменного угля можно получить $300 \div 350 \text{ м}^3$ коксового газа; при переработке 1 т сланцев – $350 \div 400 \text{ м}^3$ сланцевого газа; а при крекинге нефти выход горючих газов достигает $200 \div 250 \text{ м}^3/\text{т}$. Q_{H}^{P} газа сухой перегонки твердых топлив $15000 \div 19000$, а газа пиролиза нефти – до $46000 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

2) Газы безостаточной газификации твердого топлива получают частичным сжиганием твердых топлив в потоке воздуха, кислорода или в смеси их с водяным паром. В результате такой термохимической переработки топлива углерод, содержащийся в нем, взаимодействует с кислородом и водяным паром и образует оксид углерода и водород. Термический процесс, при котором органическая часть твердого топлива превращается с помощью воздуха (технического кислорода) и водяного пара в горючие газы, называется газификацией.

Твердый остаток газификации – шлак – содержит негорючую часть топлива (золу) с примесью некоторого количества горючей массы. При газификации битуминозных топлив получают наряду с горючими газами и жидкие продукты (смола, уксусная кислота и др.), пары которых конденсируются при охлаждении газового потока.

При подаче в газогенератор воздуха для дутья получают воздушный генераторный газ. После достижения требуемого нагрева и аккумуляирования тепла слоем кокса в окислительной и восстановительной зонах воздушное дутье прекращают и подают водяной пар в слой раскаленного кокса, что приводит к образованию водяного газа. Процессы получения в газогенераторе воздушного газа (воздушное дутье) и водяного газа (паровое дутье) ведутся одновременно с отдельным отводом продуктов этих процессов – воздушного газа и водяного газа.

При подаче в газогенератор для дутья воздуха не отдельно от пара, а в виде паровоздушной смеси получают смешанный генераторный или, так называемый, полуводяной газ.

Аппараты, в которых осуществляется газификация топлив, называются газогенераторами, а газы, получаемые таким методом, – генераторными (смешанными). К ним относятся: генераторный водяной, генераторный паровоздушный, доменный, газ подземной газификации углей и др. Q_{H}^{P} этих



газов не превышает 10500 кДж/м^3 ($10,5 \text{ МДж/м}^3$).

Существенными недостатками большинства искусственных газов являются высокая токсичность и малая теплота сгорания, обусловленная большим содержанием балластных компонентов.

Уголь можно газифицировать под землей. В этом случае получается газ подземной газификации, который имеет невысокую теплоту сгорания.

1.13. Природные газы. Газовые месторождения

Природные горючие газы, добываемые из недр Земли, в основном состоят из предельных углеводородов метанового ряда с небольшим количеством негорючих и вредных примесей. Согласно теории академика И.А. Губкина природные газы образовались в процессе биохимического и термического разложения органических остатков растительного и животного мира, погребенных вместе с осадочными породами в толще земной коры. Сформировавшиеся одновременно с нефтью, природные газы залегают вместе с ней в недрах Земли, образуя нефтегазовые месторождения. Часть их, состоящая в основном из более тяжелых компонентов, растворена в нефти, другая образует так называемую газовую шапку.

Обладая большой проникающей способностью, естественные газы могут перемещаться в пористых горных породах (песках, известняках) на далекие расстояния. Скапливаясь в антиклинальных (выпуклых) складках этих пород, они образуют чисто газовые месторождения. Кроме того, в настоящее время можно считать доказанным, что природные газы могут генерироваться в огромных количествах и независимо от процессов образования нефти при превращении органических веществ в каменный уголь.

Необходимым условием образования газовой залежи является наличие плотных подстилающих и покрывающих эту залежь газонепроницаемых пород, например глинистых. Иногда подошвой газовой залежи являются пластовая вода и нефть. Расстояние h от подошвы до кровли, достигающее иногда сотен метров, называется мощностью продуктивного пласта. Нередко на одном газовом месторождении имеется несколько газовых залежей, расположенных одна над другой. Такое месторождение называется многопластовым.

Газоносные пласты чисто газовых месторождений в нижней своей части заполнены водой. Газовые скопления занимают верхнюю часть пласта и прижаты давлением воды к расположенной над ним газонепроницаемой



Теория горения и взрыва

глинистой покрывке (кровли). По этой причине давление газа зависит от глубины, на которой находится уровень воды, воспринимающей давление вышележащих горных пород. Плотность этих пород значительно больше, чем воды, поэтому пластовое давление существенно превышает гидростатическое, которое составляет 0,1 МПа на каждые 10 м глубины. Так, на глубине 1000 м пластовое давление может быть значительно больше 10 МПа (100 кгс/см²). Газоносные пласты располагаются на большой глубине от 700 до 5000 м и более. Поэтому и пластовое давление обычно составляет многие десятки мегапаскалей (сотни атмосфер).

Природные газы в зависимости от условий образования и состава подразделяют на три группы: 1) чисто газовых; 2) газоконденсатных; 3) нефтяных месторождений.

Принято условно считать газы с содержанием тяжелых углеводородов (от пропана и выше) менее 50 г/м³ сухими (легче воздуха), а газы с содержанием тяжелых углеводородов 50 г/м³ и более – жирными.

1) Горючая часть газов чисто газовых месторождений состоит в основном из метана и небольшого количества этана и более тяжелых углеводородов. Основным балластным компонентом в них является азот. Содержание сероводорода, аммиака и других вредных примесей в сухих газах большинства месторождений незначительно. Все сухие газы легче воздуха. $Q_H^P = 33,5 \div 39,8$ МДж/м³. Состав и свойства газов чисто газовых месторождений достаточно постоянны.

2) В газах газоконденсатных месторождений при высоких давлениях наряду с легкими углеводородами содержится значительное количество паров тяжелых углеводородов. Перед подачей потребителям тяжелые углеводороды извлекаются и используются для производства сжиженного газа и моторного топлива. Содержание тяжелых углеводородов в газах конденсатных месторождений более 100 ÷ 150 г/м³ и поэтому их относят к категории жирных газов. $Q_H^P = 38 \div 42$ МДж/м³.

3) К газам нефтепромысловых месторождений относятся газы, добываемые из газовой «шапки» газонефтяных месторождений и попутно с нефтью (попутные газы). В нефтяной залежи обычно растворены углеводородные газы, причем количество их с увеличением глубины залегания нефти, а следовательно, и с увеличением пластового давления возрастает. При извлечении нефти и снижении давления из нее выделяется большое количество газов (до 500 м³/т). В попутных газах наряду с легкими углеводородами содержатся от 50 до 30 % тяжелых углеводородов и значительные количества азота, двуокиси углерода, а иногда и сероводорода. Состав



попутных газов непостоянен, но все они являются жирными газами, $\rho_{\text{отн}} \approx 1,0$; $Q_H^P \approx 60$ МДж/м³. Также как и газы конденсатных месторождений, попутные газы до транспортировки обрабатывают с целью извлечения тяжелых углеводородов.

1.14. Расчет параметров горения топлива

Каменный уголь состава: $C^r = 78,4\%$; $H^r = 5,6\%$; $S_{\text{л}}^r = 0,4\%$; $N^r = 2,6\%$; $O^r = 13\%$; сжигается в топке с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$. Температура воздуха $t = 300^\circ\text{C}$. Низшая теплота сгорания $Q_H^r = 31,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Зольность на сухую массу $A^C = 12,2\%$; влажность $W^P = 10\%$.

Определить параметры горения топлива.

Решение

Зольность рабочей массы

$$A^P = A^C \frac{100 - W^P}{100} = 12,2 \frac{100 - 10}{100} = 11\%.$$

Составляющие рабочей массы:

$$C^P = C^r \frac{100 - W^P - A^P}{100} = 78,4 \frac{100 - 10 - 11}{100} = 78,4 \cdot 0,79 = 62\%,$$

$$H^P = 5,6 \cdot 0,79 = 4,43\%,$$

$$N^P = 2,6 \cdot 0,79 = 2,05\%,$$

$$S_{\text{л}}^P = 0,4 \cdot 0,79 = 0,316\%,$$



$$O^P = 13 \cdot 0,79 = 10,24\%.$$

Низшая теплота сгорания топлива

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S_a^P) - 25W^P = \\ &= 339 \cdot 62 + 1030 \cdot 4,43 - 109(10,24 - 0,316) - 25 \cdot 10 = \\ &= 24200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 24,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

Эта же теплота сгорания топлива также может быть определена по формуле

$$\begin{aligned} Q_H^P &= Q_H^r \frac{100 - W^P - A^P}{100} - 25W^P = 31,02 \cdot 10^3 \frac{100 - 10 - 11}{100} - 25 \cdot 10 = \\ &= 24200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 24,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

Физическая теплота топлива $i_{\text{фТ}}$ мала и ею можно пренебречь, тогда располагаемая теплота топлива

$$Q_P^P = Q_H^P = 24,2 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Теоретически необходимый объем воздуха

$$\begin{aligned} V^O &= 0,0889(C^P + 0,375S_a^P) + 0,265H^P - 0,033 \cdot O^P = \\ &= 0,0889(62 + 0,375 \cdot 0,316) + 0,265 \cdot 4,43 - 0,033 \cdot 10,24 = 6,36 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \end{aligned}$$

Теоретические объемы продуктов сгорания

$$V_{RO_2}^O = 0,01866(C^P + 0,375S_a^P) = 0,01866(62 + 0,375 \cdot 0,316) = 1,15 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

$$V_{N_2}^O = 0,79V^O + 0,08N^P = 0,79 \cdot 6,36 + 0,008 \cdot 2,05 = 5,04 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$



Теория горения и взрыва

$$V_{H_2O}^O = 0,111H^P + 0,0124W^P + 0,0161V^O =$$

$$= 0,111 \cdot 4,43 + 0,0124 \cdot 10 + 0,0161 \cdot 6,36 = 0,72 \frac{M^3}{кг}$$

Суммарный теоретический объем продуктов сгорания

$$V_r^O = V_{RO_2}^O + V_{N_2}^O + V_{H_2O}^O = 1,15 + 5,04 + 0,72 = 6,91 \frac{M^3}{кг}$$

Действительный объем воздуха на 1 кг топлива

$$V = \alpha V^O = 1,2 \cdot 6,36 = 7,65 \frac{M^3}{кг}$$

Действительный объем продуктов сгорания

$$V_{RO_2} = V_{RO_2}^O = 1,15 \frac{M^3}{кг}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^O + (\alpha - 1)V^O = 5,04 + (1,2 - 1)6,36 = 6,31 \frac{M^3}{кг}$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^O + 0,0161(\alpha - 1)V^O = 0,72 + 0,0161(1,2 - 1)6,36 = 0,74 \frac{M^3}{кг}$$

Суммарный объем продуктов сгорания

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} = 1,15 + 6,31 + 0,74 = 8,2 \frac{M^3}{кг}$$

Концентрация золы в дымовых газах

$$\mu = 10A^P \cdot a_{вн} \cdot \frac{1}{V_r} = 10 \cdot 11 \cdot 0,95 \frac{1}{8,2} = 18,5 \frac{г}{M^3}$$

где коэффициент уноса золы $a_{вн}$ приняли равным 0,95.

Принимаем потери теплоты от химической неполноты горения $q_{ХИМ} = 0,5\%$, от механического недожога $q_{МЕХ} = 5\%$; потерями теплоты с удаляемым шлаком пренебрегаем, т. е. $q_{ФШЛ} = 0$. При промышленном сжигании топлива потерями теплоты от диссоциации можно пренебречь.



Теория горения и взрыва

Энтальпия воздуха при $t = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $i_{\text{ов}} = 403 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$.

Энтальпия подаваемого воздуха

$$J_B = \alpha J_B^O = 1,2 \cdot 6,36 \cdot 403 = 3090 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Полезное тепловыделение

$$Q_T = Q_P \frac{100 - (q_{\text{ХИМ}} + q_{\text{МЕХ}} + q_{\text{ФШЛ}} + q_{\text{ДИС}})}{100 - q_{\text{МЕХ}}} + J_B =$$

$$= 24,2 \cdot 10^3 \frac{100 - (0,5 + 5 + 0 + 0)}{100 - 5} + 3009 = 27110 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 27,11 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Для определения теоретической температуры горения задаемся рядом температур в районе ожидаемой – 1600, 1800, 2000, 2200 °С. Для принятых температур определяем энтальпии продуктов сгорания. Теоретические значения энтальпий

$$J_r^O = V_{\text{RO}_2}^O i_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^O i_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^O i_{\text{H}_2\text{O}}, \quad J_B^O = V^O i_B.$$

Действительные значения энтальпии воздуха и продуктов сгорания

$$J_B = \alpha J_B^O, \quad J_r = J_r^O + (\alpha - 1) J_B^O.$$

Удельные значения энтальпий воздуха и продуктов сгорания определяем по табл.3 (см. прил.). Объем SO₂ в продуктах сгорания топлива мал по сравнению с объемом CO₂ поэтому при определении энтальпии i_{RO_2} следует пользоваться данными по CO₂. Это справедливо и потому, что $i_{\text{CO}_2} \approx i_{\text{SO}_2}$.



Расчетные данные по определению энтальпии продуктов сгорания сведены в табл. 5.

Расчет энтальпии продуктов сгорания.

Таблица 5

Определяемая величина и расчетная формула	Значение $\left(\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}\right)$ при температуре $^{\circ}\text{C}$			
	1600	1800	2000	2200
i_B	2,403	2,729	3,064	3,399
$J_B^O = V^O i_B$	15,300	17,340	19,450	21,600
i_{RO_2}	3,767	4,303	4,843	5,387
$J_{RO_2}^O = V_{RO_2}^O i_{RO_2}$	4,330	4,950	5,570	6,190
i_{N_2}	2,323	2,642	2,964	3,290
$J_{N_2}^O = V_{N_2}^O i_{N_2}$	11,700	13,310	14,930	16,750
i_{H_2O}	3,001	3,458	3,926	4,399
$J_{H_2O}^O = V_{H_2O}^O i_{H_2O}$	2,160	2,480	2,820	3.160
$J_r^O = J_{RO_2}^O + J_{N_2}^O + J_{H_2O}^O$	18,190	20,740	23,320	25,920
$J_r = J_r^O + (\alpha - 1)J_B^O$	21,490	24,210	27,210	30,350
$(\alpha - 1)J_B^O$	3,300	3,470	3,890	4,430

Расчет теоретической температуры горения топлива проводим



Теория горения и взрыва

графически. Для этого строим график $J_r = f(T)$ (рис.1).

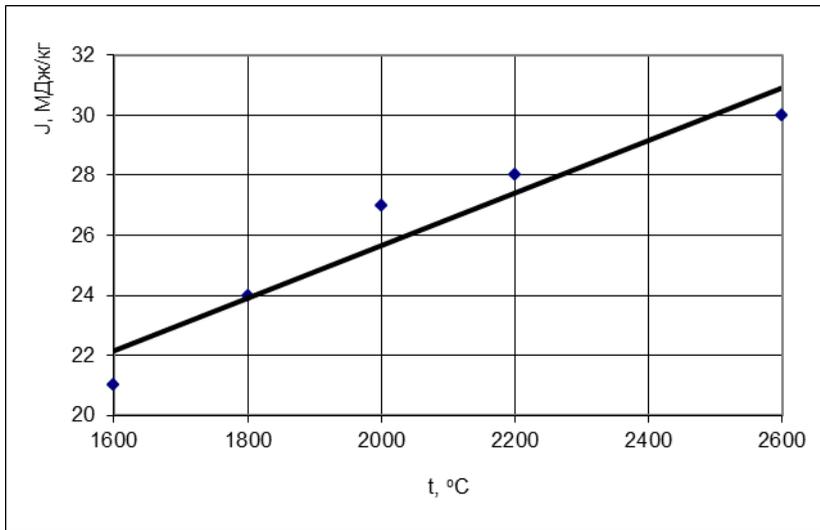


Рис.1

Искомая температура $T_a = 1990 \text{ }^\circ\text{C}$ определяется из графика по известному значению энтальпии продуктов сгорания $J_r = Q_T = 27,11 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

Такой же результат можно получить с помощью интерполирования. Из сравнения $Q_T = 27,11 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ с полученными данными в табл.5 видно, что искомая температура находится в пределе 1800-2000 $^\circ\text{C}$. Искомая температура

$$T_a = 1800 + \frac{2000 - 1800}{27,21 - 24,21} (27,21 - 24,21) = 1990 \text{ }^\circ\text{C}.$$

На этом расчет параметров горения топлива заканчивается.



ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА

2.1. Основные положения

Взрыв возникает при быстром выделении большого количества энергии. Продолжительность взрывчатого превращения колеблется от нескольких сотых до миллионных долей секунды. Поэтому мощность взрыва очень большая. Она обусловлена не только большим запасом внутренней энергии, но чрезвычайно малой продолжительностью взрывного горения смеси.

Это горение отличается от обычного горения только скоростью прохождения химической реакции. При обычном горении энергия, выделившаяся в зоне реакции, передается от горячих продуктов к ближайшим слоям исходного вещества в форме теплоты за счет процессов теплопередачи, а при взрывном горении за счет ударной волны. Такой процесс горения называется детонацией.

При прохождении ударной волны по взрывчатой газообразной среде слой газа, охваченный волной, подвергается очень быстрому и сильному сжатию. Температура этого слоя поднимается до десятков тысяч градусов, и в газе возникает интенсивная химическая реакция. Продукты реакции, нагретые за счет ее теплового эффекта до высокой температуры и находящиеся соответственно под большим давлением, поддерживают дальнейшее распространение ударной волны, компенсируя потери энергии.

Скорость ударной волны, а следовательно, и скорость детонации не зависят от величины начального импульса, если только последняя достаточна для возбуждения устойчивой реакции. Аналогичные явления возникают и в конденсированных взрывчатых веществах (ВВ). Детонация в них будет возникать и распространяться в том случае, если реакция в охваченном волной слое произойдет со скоростью, достаточной для того, чтобы ее энергия могла поддерживать распространение ударной волны. Иными словами, интенсивность ударной волны, возникающей при детонации слоя взрывчатого вещества, должна быть достаточна, чтобы вызвать такой же процесс в соседнем слое. Реакция, как и в газах, возникает в результате подъема температуры в слое вещества, сжатого ударной волной. Скорость детонационного горения достигает километров в секунду.

Теплота взрывчатого превращения – это количество теплоты, выделяющееся при взрыве 1 кг (1 моля) взрывчатого вещества.

Теплота взрыва равна разности между теплотой образования



Теория горения и взрыва

продуктов взрыва и теплотой образования самого взрывчатого вещества.

Температурой взрыва называют максимальную температуру продуктов разложения взрывчатого вещества. В основе вычисления температуры лежит предположение, что процесс адиабатный, происходит при постоянном объеме, вся выделяющаяся теплота идет на нагрев продуктов реакции, т. е.

$$Q_V = C_V \cdot t, \tag{36}$$

где C_V – средняя теплоемкость в интервале температур $0 - t$;

t – температура взрыва;

Q_V – теплота взрывчатого превращения;

Приближенно теплоемкость можно представить линейно зависящей от температуры, т. е.

$$C_V = a + b \cdot t, \tag{37}$$

где a и b – экспериментальные коэффициенты. Значения a , b берутся из справочной литературы. Для некоторых газов мольная теплоемкость при постоянном объеме приведена в табл.4 (см. прил.).

Температура t берется в $^{\circ}\text{C}$.

Из уравнений (36) и (37) получим

$$Q_V = (a + b \cdot t)t. \tag{38}$$

Теперь температура взрыва определится

$$t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_V}}{2b}. \tag{39}$$

Объем газов, образовавшийся в результате взрыва, может быть определен по формуле:

$$V_O = \frac{\sum N_{\text{ПР.РЕАК}}}{N_{\text{И.В.}} \cdot M} \cdot 22,4, \frac{\text{M}^3}{\text{КЗ}} \tag{40}$$

при 0°C и 760 мм рт. ст.

Здесь $\sum N_{\text{ПР.РЕАК}}$ – сумма числа молей продуктов реакции;

$N_{\text{И.В.}}$ – число молей исходного вещества;



M – молекулярная масса взрывчатого вещества.

Если бы газообразные продукты взрывчатого превращения подчинялись законам идеального газа и все взятое количество взрывчатого вещества (ВВ) обращалось в газы, то давление, развиваемое при взрыве M кг ВВ в объеме V , можно бы было вычислить по уравнению состояния

$$P = NR_{\mu}T \frac{M}{V}, \quad (41)$$

где N – число молей продуктов реакции;

$$R_{\mu} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} - \text{универсальная газовая постоянная.}$$

Формула (41) применима только при весьма небольших количествах ВВ и соответственно малых давлениях, когда можно считать, что продукты взрыва подчиняются уравнению состояния идеальных газов.

При больших массах ВВ и высоких давлениях продукты взрыва приближенно могут быть описаны уравнением Ван-Дер-Ваальса

$$(P + \beta)(V - \alpha) = R_{\mu}T. \quad (42)$$

Величина β характеризует притяжение молекул и очень мала по сравнению с высоким давлением продуктов взрыва, поэтому величиной β можно пренебречь. Величину α , характеризующую объем, занимаемый самими молекулами, определить затруднительно.

Приближенно ее принимают равной 0,001 объема, который газы занимают при нормальных условиях.

Теперь

$$P = \frac{R_{\mu}T}{V - \alpha}, \quad (43)$$

где V – объем, в котором происходит взрыв.

В случае взрыва газо-воздушных смесей в определенном объеме $V = \text{const}$ давление взрыва $P_{\text{ВЗР}}$ определится из уравнения состояния идеального газа

$$P_{\text{ВЗР}} = P_0 \frac{T_{\text{ВЗР}}}{T_0} \frac{(\sum N_i)_{\text{ПР.ВЗР}}}{(\sum N_i)_{\text{СМ}}}, \quad (44)$$



Здесь P_o и T_o – давление и температура смеси до взрыва;

$(\sum N_i)_{\text{пр.взр}}$ – число молей продуктов взрыва;

$(\sum N_i)_{\text{см}}$ – число молей исходных веществ до взрыва.

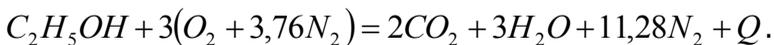
При взрыве газо-воздушных смесей давление обычно не превышает 1,0 МПа, если первоначальное давление смеси было нормальным. Температура взрыва таких смесей существенно ниже температуры взрыва, где окислителем выступает кислород. При взрыве газо-воздушных смесей значительное количество теплоты затрачивается на нагрев азота воздуха.

2.2. Расчет параметров взрыва газо-воздушных смесей

Рассчитать температуру и давление при взрыве паров этилового спирта при начальной температуре 300 °С и давлении 0,1 МПа. Концентрация компонентов стехиометрическая.

Решение

Уравнение реакции горения этилового спирта в воздухе



Здесь число 3,76 получается исходя из того, что в воздухе 21% O_2 и 79% N_2 по объему, т. е. на один объем O_2 приходится $\frac{79}{21} = 3,76$ объемов N_2 .

Внутренняя энергия исходной смеси

$$U_{\text{и.см}} = N_1 C_{V_1} t_0 + N_2 C_{V_2} t_0 + N_3 C_{V_3} t_0,$$

здесь N_i – число молей отдельных компонентов смеси;

C_{V_i} – теплоемкость компонентов смеси при постоянном объеме;

t_0 – начальная температура.

Теплоемкость паров этилового спирта определяем по справочной литературе



$$C_{V_{ст}} = 62,79 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Внутреннюю энергию O_2 и N_2 при $t_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ определяем из табл.6 (см. прил.).

Внутренняя энергия паров спирта

$$N_1 C_{V_1} t_0 = 1 \cdot 62,79 \cdot 300 = 18837 \text{ Дж} = 18,837 \text{ кДж}.$$

Внутренняя энергия кислорода O_2

$$N_2 U_{O_2} = 3 \cdot 6,226 = 18,678 \text{ кДж}.$$

Внутренняя энергия азота N_2

$$N_3 U_{N_2} = 11,28 \cdot 6,238 = 70,36 \text{ кДж}.$$

Внутренняя энергия исходной смеси

$$U_{CM} = 18,837 + 18,678 + 70,36 = 107,88 \text{ кДж}.$$

Теплота взрыва складывается из теплоты сгорания паров этилового спирта и внутренней энергии смеси, т. е.

$$Q_B = N_1 Q_P + U_{CM}.$$

Теплоту сгорания химического вещества определяем из табл.6 (см. прил.).

$$Q_P = 1370,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Теплота взрыва

$$Q_B = 1 \cdot 1370,7 + 107,88 = 1478,58 \text{ кДж}.$$

Число молей продуктов взрыва

$$N_{ПР} = N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{N_2} = 2 + 3 + 11,28 = 16,28.$$

Средняя внутренняя энергия продуктов взрыва

$$Q_{CP} = \frac{Q_B}{N_{ПР}} = \frac{1478,58}{16,28} = 90,82 \frac{\text{кДж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}.$$



Теория горения и взрыва

Задаемся температурами продуктов взрыва в районе ожидаемой $t_B = 2800^\circ\text{C}$ и 3000°C .

Вычислим внутреннюю энергию продуктов взрыва при этих температурах. Для этого воспользуемся данными табл.5 (см. прил.).

$$Q_{2800} = 2 \cdot 127,3 + 3 \cdot 100,555 + 11,28 \cdot 70,865 = 1355,6 \text{ кДж.}$$

Сравнивая полученное значение внутренней энергии продуктов взрыва с расчетным значением Q_B находим, что искомая температура выше 2800 K .

Вычислим внутреннюю энергию продуктов взрыва при $t = 3000^\circ\text{C}$.

$$Q_{3000} = 2 \cdot 138,177 + 3 \cdot 109,769 + 11,28 \cdot 76,605 = 1477,8 \text{ кДж.}$$

$$Q_{3000} < Q_B.$$

Проводим расчет для температуры $T = 3200 \text{ K}$.

$$Q_{3200} = 2 \cdot 149,138 + 3 \cdot 118,941 + 11,28 \cdot 82,379 = 1584,3 \text{ кДж.}$$

Для определения температуры взрыва строим график $Q_B = f(t)$ (рис.2).

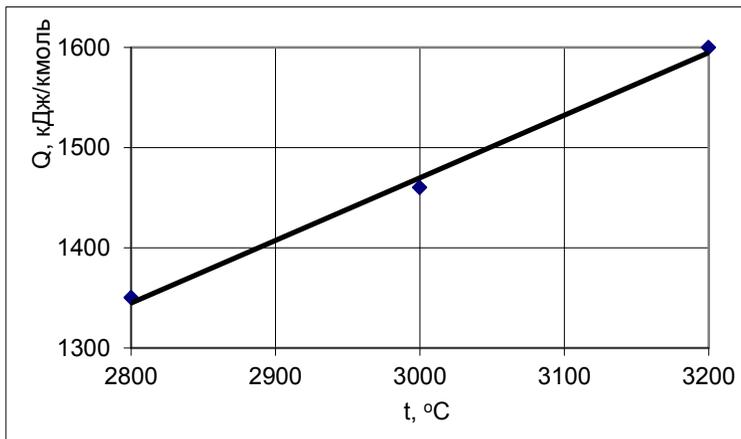


Рис. 2.

Искомая температура при $Q_B = 1478 \text{ кДж}$ равна 3010°C .

Число молей исходных веществ



$$\left(\sum N_i\right)_{CM} = N_1 + N_2 + N_3 = 1 + 3 + 11,28 = 15,28.$$

Давление взрыва

$$P_B = P_O \frac{T_B}{T_O} \frac{\left(\sum N_i\right)_{ПР.ВЗР}}{\left(\sum N_i\right)_{CM}} = 0,1 \frac{3010 + 273}{300 + 273} \cdot \frac{16,28}{15,28} = 0,61 \text{ МПа.}$$

Пример расчета параметров взрыва взрывчатого вещества

Вычислить параметры взрыва тротила.

Решение

Уравнение взрывчатого превращения тротила



Пользуясь табл.6 (см. прил.), найдем теплоты образования продуктов взрыва $\Delta H_{CO}^O = 110,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$,

$$\Delta H_{CO_2}^O = 393 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

$$\Delta H_{H_2O}^O = 242 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

$$\Delta H_{NH_3}^O = 46,19 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}},$$

следовательно

$$2CO - 2 \cdot 110,5 = 221 \text{ кДж,}$$

$$1,2CO_2 - 1,2 \cdot 393 = 471,6 \text{ кДж,}$$

$$1,6H_2O - 1,6 \cdot 242 = 387,2 \text{ кДж,}$$



Теория горения и взрыва

$$0,2NH_3 - 0,2 \cdot 46,19 = 9,2 \text{ кДж.}$$

Сумма теплоты образования всех продуктов взрыва – 1089 кДж.

$$\text{Теплота образования тротила} - 54,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Теплота взрывчатого превращения

$$Q_B = 1089 - 54,5 = 1034,5 \text{ кДж.}$$

Вычислим теплоемкость продуктов взрыва. Для этого используем табл.4 (см. прил.).

$$C_{VCO} = (20,75 + 28,18 \cdot 10^{-4} t) \cdot 2 = 41,5 + 56,36 \cdot 10^{-4} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$C_{VC} = 8,04 \cdot 3,8 = 30,6, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$C_{VCO_2} = (27,74 + 20,3 \cdot 10^{-3} t) \cdot 1,2 = 33,29 + 24,36 \cdot 10^{-3} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$C_{VH_2O} = (24,58 + 5,443 \cdot 10^{-3} t) \cdot 1,6 = 39,3 + 8,7 \cdot 10^{-3} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$C_{VH_2} = (20,46 + 11,167 \cdot 10^{-4} t) \cdot 0,6 = 12,28 + 6,7 \cdot 10^{-4} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

$$C_{VNH_3} = (27,29 + 18,55 \cdot 10^{-4} t) \cdot 0,2 = 5,46 + 3,7 \cdot 10^{-4} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

$$C_{VN_2} = (20,66 + 25,66 \cdot 10^{-4} t) \cdot 1,4 = 28,9 + 35,9 \cdot 10^{-4} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}},$$

Теплоемкость продуктов взрыва получим, если почленно сложим выражения для теплоемкостей отдельных продуктов взрыва

$$C_{VTP.B3P} = 190,75 + 399,2 \cdot 10^{-4} t, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$



Теория горения и взрыва

Температуру взрыва определим по формуле (39).

В этой формуле коэффициенты $a = 190,75$; $b = 399,2 \cdot 10^{-4}$;

$$Q_V = Q_B = 1034,5 \text{ кДж} = 1034500 \text{ Дж.}$$

$$t = \frac{-190,75 + \sqrt{190,75^2 + 4 \cdot 399,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1034500}}{2 \cdot 399,2 \cdot 10^{-4}} = 3230 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Значительная часть теплоты реакции обращается в упругую энергию отталкивания молекул сильно сжатых продуктов детонации. В связи с этим температура продуктов детонации оказывается несколько меньшей, чем по приведенному расчету.

Объем продуктов взрывчатого превращения (40)

$$V_O = \frac{\sum N_{\text{ИПР.РЕАК}} \cdot 22,4}{N_{\text{ИСХ.ВЕЩ.}} \cdot M} = \frac{2 + 1,2 + 0,6 + 1,6 + 1,4 + 0,2}{1 \cdot 227} \cdot 22,4 \cdot 1000 = 691 \frac{\text{л}}{\text{кг}} = 0,691 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Давление взрыва определяется по формуле (43), при этом необходимо задать объем, в котором происходит взрыв.



ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Задание по расчету параметров горения топлива

Каменный уголь, состав которого приведен в табл.1 сжигается в топке с коэффициентом избытка воздуха α и температурой воздуха $t^{\circ}\text{C}$.

Определить основные параметры горения топлива:

- состав рабочей массы топлива;
- теплоту сгорания;
- потребное количество воздуха;
- объем продуктов сгорания;
- концентрацию золы в дымовых газах;
- полезное тепловыделение;
- адиабатную температуру горения.

Таблица 1

Состав продуктов сгорания, температура и коэффициент избытка воздуха

№ варианта	C	H	S	N	O	A	W	α	t
	%	%	%	%	%	%	%	-	$^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	90,0	3,0	0,8	1,2	5	12,0	10,0	1,1	300
2	84,0	4,0	2,0	3,0	7	10,0	12,0	1,25	200
3	73,5	5,0	3,0	1,5	17,0	5,0	11,0	1,3	250
4	83,0	5,0	1,0	2,0	9	4,0	5,0	1,15	270
5	78,5	5,6	0,4	2,3	13,2	9,5	10,5	1,2	300



Теория горения и взрыва

6	84,5	5,8	0,6	2,2	9,9	10,0	8,5	1,3	350
7	85,5	5,6	0,7	2,4	5,8	16,5	6,0	1,35	200
8	84,1	5,1	0,5	2,1	8,2	12,4	7,5	1,25	240
9	87,3	4,7	0,6	2,1	5,3	12,0	6,0	1,2	260
10	90,5	4,2	0,4	2,0	2,9	16,5	5,5	1,15	300
11	89,0	4,4	0,8	2,0	3,8	19,0	7,0	1,18	320
12	75,5	5,5	4,2	1,6	13,2	18,0	13,0	1,2	200
13	81,0	5,4	4,3	1,5	7,8	19,5	7,0	1,4	250
14	89,0	4,2	3,1	1,5	2,2	17,0	4,5	1,3	270
15	91,0	,35	2,0	1,3	2,2	17,0	5,0	1,35	300
16	92,5	2,0	2,1	0,8	2,6	20,5	7,5	1,2	320
17	70,0	4,8	0,8	0,8	23,6	12,5	39,0	1,3	250
18	75,0	5,0	3,9	2,0	14,1	28,0	11,0	1,15	280
19	84,5	5,3	1,1	1,8	7,6	19,0	5,0	1,3	300
20	85,6	5,2	1,0	1,3	6,9	26,0	5,5	1,4	320
21	67,0	5,2	6,1	1,3	20,4	34,0	33,0	1,2	250

Окончание табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22	77,0	5,7	6,8	1,3	9,2	28,0	5,0	1,15	270
23	71,5	5,2	2,7	1,7	18,9	39,0	17,0	1,25	300
24	80,0	5,3	1,6	1,5	11,6	39,0	8,0	1,2	340
25	70,0	4,8	0,8	0,8	23,6	12,0	39,0	1,3	250
26	80,0	5,0	2,0	2,0	11,0	14,0	6,0	1,4	280



Теория горения и взрыва

27	85,0	4,0	1,0	1,0	9,0	13,0	12,0	1,35	290
28	87,0	5,0	1,5	1,5	6,0	15,0	13,0	1,3	300
29	77,0	3,0	2,0	2,0	16,0	17,0	6,0	1,4	320
30	81,0	4,0	2,0	2,0	12,0	10,0	8,0	1,2	250

2. Задание по расчету параметров взрыва газо-воздушной смеси

Рассчитать температуру и давление при взрыве газо-воздушной (паро-воздушной) смеси при начальной температуре t и давлении 0,1 МПа. Концентрация смеси стехиометрическая. Исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Вид вещества и температура газо-воздушной смеси

№ варианта	Название вещества	Химическая формула	Температура смеси, t°С
1	Ацетон	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	40
2	Ацетилен	C_2H_2	30
3	Аммиак	NH_3	50
4	Бензол	C_6H_6	20
5	Бутан	C_4H_{10}	27
6	Бутилен	C_4H_8	30
7	Декан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	40
8	Диметиловый эфир	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	50
9	Дэтиловый эфир	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	20
10	Гексан	C_6H_{14}	25
11	Гептан	C_7H_{16}	17
12	Изопрепен	C_5H_{10}	35



Теория горения и взрыва

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
13	Изопропиловый спирт	$(\text{CH}_3)_2\text{OH}$	40
14	Метан	CH_4	45
15	Метиловый спирт	CH_3OH	50
16	Ионан	C_9H_{20}	20
17	Октан	C_8H_{18}	25
18	Пропан	C_5H_8	30
19	Пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	40
20	Пентан	C_5H_{12}	45
21	Пропилен	C_3H_6	20
22	Сероводород	H_2S	40
23	Этан	C_2H_6	35
24	Этилен	C_2H_4	30
25	Этиловый эфир	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	38
26	Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	40
27	Циклопропан	C_3H_6	47
28	Циклопентан	C_5H_{10}	50
29	Циклогексан	C_6H_{10}	30
30	Метиловый спирт	CH_3COOH_3	25



Таблица 3

Теплосодержание газов при постоянном давлении

Теплосодержание, кДж/м						
Температура, t°C	O	N	Воздух	CO	HO	SO
1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0
100	131,8	130,1	130,1	170,1	150,6	181,4
200	267,2	260,9	261,6	357,7	304,7	377,9
300	407,1	393,6	395,4	559,7	463,0	587,0
400	551,4	528,7	532,1	772,6	626,8	824,6
500	669,3	666,6	672,0	952,1	786,2	1034,9
600	850,6	807,8	814,5	1225,6	969,5	1269,6
700	1004,7	951,9	960,3	1463,1	1149,7	1507,5
800	1160,6	1098,2	1108,2	1706,2	1335,3	1746,4
900	1319,0	1246,9	1258,7	1953,8	1527,2	1994,8
1000	1478,6	1398,2	1410,7	2205,2	1724,2	2237,4
1100	1639,5	1551,1	1564,9	2460,4	1926,5	2488,8
1200	1802,1	1705,3	1720,4	2718,5	2133,9	2735,2



Теория горения и взрыва

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
1300	1965,1	1808,2	1877,5	2979,1	2345,5	2979,5
1400	2129,8	1861,2	2035,5	3241,4	2560,9	3238,0
1500	2295,7	2176,7	2194,7	3505,7	2783,1	3488,2
1600	2162,4	2335,5	2355,2	3771,4	3004,2	3747,5
1700	2630,5	2495,9	2515,7	4039,6	3231,7	4003,1
1800	2799,7	2656,4	2678,2	4307,3	3461,3	4161,2
1900	2969,4	2818,2	2840,4	4579,7	3693,5	4529,8
2000	3140,8	2979,9	3004,2	4847,8	3928,5	4667,6
2100	3311,7	3142,9	3167,6	5118,2	4166,1	5059,4
2200	3497,8	3306,3	3332,3	5302,5	4405,8	5337,2
2300	3659,1	3469,3	3497,4	5660,7	4667,1	5608,7
2400	3834,3	3633,1	3663,3	5933,0	4890,9	5892,8
2500	4009,8	3797,4	3828,8	6209,6	5136,5	6169,8
2600	4184,9	3953,9	3988,4	6487,4	5387,1	6460,1
2700	4368,9	4135,9	4156,5	6761,8	5639,3	6753,8
2800	4546,1	4304,4	4320,7	7033,3	5807,8	7050,9
2900	4729,2	4469,0	4484,9	7311,1	6159,3	7351,3
3000	4914,9	4634,5	4652,1	7589,7	6425,8	7655,1



Теория горения и взрыва

Таблица 4

К расчету мольной теплоемкости для некоторых газов

при $v=\text{const}$

№ п\п	Вещество	Мольная теплоемкость при $v=\text{const}$, кДж/моль·К
1	H ₂	$20,46 + 11,167 \cdot 10^{-4} \cdot t$
2	O ₂	$21,19 + 34,04 \cdot 10^{-4} \cdot t$
3	CO	$20,75 + 28,18 \cdot 10^{-4} \cdot t$
4	CO ₂	$27,74 + 20,3 \cdot 10^{-3} t - 6,42 \cdot 10^{-6} 1/t^2$
5	H ₂ O	$24,58 + 5,443 \cdot 10^{-3} t$
6	N ₂	$20,66 + 25,66 \cdot 10^{-4} \cdot t$
7	NH ₃	$27,29 + 18,85 \cdot 10^{-4} \cdot t$
8	C	8,04

Таблица 5

Внутренняя энергия газов

Темпера- тура, t°c	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	S ₂ O
300	6,033	6,226	6,238	6,947	7,483	9,029
400	8,111	8,371	8,329	10,056	10,051	11,459
500	10,206	10,600	10,437	13,529	12,704	15,272



Теория горения и взрыва

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7
600	12,306	12,943	12,595	17,314	15,461	19,085
700	14,417	15,364	14,807	21,327	18,356	21,389
800	16,542	17,874	17,091	15,559	21,369	27,528
900	18,687	20,451	19,441	29,968	24,494	32,011
1000	20,862	23,086	21,850	34,504	27,741	36,494
1200	25,320	28,487	26,849	43,948	34,456	45,796
1400	29,945	34,035	34,024	53,853	41,778	55,224
1600	34,739	39,700	37,337	63,771	49,383	64,693
1800	39,704	45,603	42,763	74,091	57,348	74,414
2000	44,820	51,218	48,268	84,495	65,598	84,219
2200	50,070	57,252	53,815	95,062	74,083	94,048
2400	55,442	63,289	59,447	105,727	82,760	103,878
2600	60,922	75,025	65,150	116,473	91,603	113,708
2800	66,503	81,927	70,865	127,300	100,555	123,537
3000	72,168	88,295	76,605	138,177	109,769	133,363
3200	77,913	94,740	82,379	149,138	118,941	138,990
3400	83,702	101,255	88,186	160,212	128,214	148,807
3600	89,590	107,833	94,011	171,329	137,624	158,666
3800	95,519	114,319	99,851	182,445	147,148	168,484
4000	101,494	120,065	105,701	193,624	156,752	182,943



Теория горения и взрыва

Таблица 6

Физические свойства веществ

№ варианта	Название вещества	Химическая формула	ΔH^0	C_p^0	Q_p	M	A
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ацетон	CH_3COCH_3	247,7	125	1824,4	58	ж
2	Ацетилен	C_2H_2	226,7	43,93	1305,4	26	г
3	Аммиак	NH_3	46,19	35,60	-	31	г
4	Бензол	C_6H_6	-82,6	81,6	3273,1	78	ж
5	Бутан	C_4H_{10}	124,7	97,8	2657,0	58	г
6	Бутилен	C_4H_8	1,17	89,3	2717,3	56	г
7	Декан	C	-	314,6	6737,1	142	ж
8	Диметилвый эфир	$(CH_3)_2O$	185,3	65,9	1454,3	46	г
9	Диэтиловый эфир	$(C_2H_5)_2O$	-	172,0	2726,7	74	ж
10	Гексан	C_6H_{14}	-	195,0	4141,3	86	ж
11	Гептан	C_7H_{16}	198,0	224,7	4811,0	100	ж



Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8
12	Изопрен	C_5H_8	75,7	2,24	3177,0	68	ж
13	Изопропиловый спирт	$(CH_3)_2CHOH$	-	155,2	2004,0	60	ж
14	Метан	CH_4	74,8	35,71	882,0	16	г
15	Метиловый спирт	CH_3OH	238,6	81,60	715,0	32	ж
16	Нонан	C_9H_{20}	-	284,5	6124,0	73	ж
17	Октан	C_8H_{18}	208,0	254,0	5450,0	114	ж
18	Пропан	C_3H_8	103,8	73,5	2202,0	44	г
19	Пропиловый спирт	C_3H_7OH	-	143,3	2010,0	60	ж
20	Пентан	C_5H_{12}	146,4	-	3487,0	72	ж
21	Пропилен	C_3H_7	20,4	-	2051,0	42	г
22	Сероводород	H_2S	21,0	34,2	-	34	г
23	Этан	C_2H_6	84,7	43,9	1541,0	26	г
24	Этилен	C_2H_4	52,3	43,6	1395,0	28	г
25	Этиловый эфир	$CH_3COOC_2H_5$	-	170,0	2246,4	88	ж
26	Этиловый спирт	C_2H_5OH	277,5	113,0	1370,7	46	ж
27	Циклопропан	C_3H_6	-	-	2079,0	42	г
28	Циклопентан	C_5H_{10}	-	127,0	3278,6	70	ж
29	Циклогексан	C_6H_{10}	-	152,3	3924,0	84	ж
30	Метиловый эфир	CH_3COOCH_3	-	-	1595,0	74	ж



В данной таблице:

ΔH^0 - стандартная теплота образования, кДж/моль;

C_p^0 - стандартная теплоемкость, при $p = \text{const}$, кДж/(моль·К);

Q_p - теплота сгорания при $p = \text{const}$, кДж/моль;

M - молекулярная масса, кг/моль;



ЛИТЕРАТУРА

1. Краткий курс теории горения органических топлив: Учеб. пособ./А.А.Кудинов; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2004. 210 с
2. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1988. 488 с.
3. Ахмедов Р.Б., Брюханов О.Н., Иссерлин А.С. и др. Рациональное использование газа в энергетических установках. Л.: Недра, 1990. 423 с.
4. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчёт парового котла. М.: Энергоатомиздат, 1988. 207 с.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). М.: Энергия., 1998. 297 с.
6. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. М.: Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
7. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. Л.: Недра, 1975. 390 с.

[оглавление](#)