

При сравнении тепловых свойств генераторного газа и полугаза преимущества у генераторного газа, однако в случае отсутствия централизованной газогенераторной станции и иных видов газообразного топлива (доменного, коксового газов), целесообразность оборудования печей полугазовыми топками несомненна.

В настоящей статье разобраны тепловые характеристики полугаза, которые могут быть получены расчетным путем; выводы из методики и результатов расчета могут быть использованы при проектировании и установлении режимов работы полугазовых топок.

ОБЫЧНО ПРИМЕНЯЕМЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛУГАЗА, УСЛОВНОСТЬ ЕГО

Обычно применяемый метод расчета состава и тепловых свойств полугаза основан на таких допущениях:

- 1) Содержание CO в полугазе, получающееся по реакции



есть результат горения с недостатком воздуха такого количества углерода топлива, которое является разностью между количеством элементарного углерода в топливе и количеством углерода, сгорающего до CO_2 и обуславливающего высокую температуру полугаза.

- 2) Конституционная влага топлива (влага Дюлонга) целиком или частично, в зависимости от вида топлива, участвует в газовой реакции, идущей до конца



При этом, участвующая в реакции окись углерода CO заимствована из ранее полученной CO . В полугазе, следовательно, увеличивается содержание H_2 , уменьшается CO и увеличивается CO_2 .

- 3) Свободный водород (элементарный водород топлива минус связанный водород Дюлонга) переходит в состав полугаза.

- 4) В зависимости от произвольно принятой при расчете температуры полугаза, выходящего из топки (обычно принимают температуру полугаза от 900° до $1100^\circ C$), теплосодержание полугаза (физическое тепло) при принятой температуре обусловлено 80% количеством выделенного тепла при частичном сгорании углерода топлива в самой топке по реакции



Составив уравнение теплосодержания газов как функцию количества, сгоревшего до CO_2 углерода в топке, определяется решением уравнения количество углерода, сгоревшего до CO , и алгебраическим способом вычисляется состав газа.

- 5) Рабочая влага топлива в виде водяного пара переходит в состав полугаза.

- 6) Углеводороды типа CH_4 , $C_m H_n$ в полугазе отсутствуют.

Этот метод принят по аналогии с алгебраическим методом расчета генераторного газа, предложенным проф. В. Е. Грум-Гржимайло.

Таким образом, для одного и того же вида топлива состав полугаза, его теплотворная способность и теплосодержание (физическое тепло) зависят от предварительно принятой в расчетах температуры полугаза; очевидно, чем выше будет принята температура полугаза, тем больше будет CO_2 в полугазе, тем меньше будет его теплотворная способность (так как соответственно уменьшится содержание CO вследствие уменьшения количества углерода, сгорающего до CO по реакции $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$).

Условность изложенного метода расчета полугаза в том, что 1) метод не отражает динамического равновесия реакции $CO_2 + C \rightleftharpoons 2 CO$ в зависимости от температуры очага газификации и времени соприкосновения газов с раскаленным слоем топлива; 2) рабочая влага топлива в виде пара будто бы не участвует в равновесной реакции $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$, а механически переходит в состав полугаза.

Вследствие этого в составе полугаза обычно получается меньшее содержание CO_2 , чем в практических условиях работы полугазовой топки; содержание CO по расчету больше практического; содержание H_2 по расчету больше практического. Метан CH_4 в практическом полугазе всегда имеет место, по расчету же его не должно быть. Принимаемые при расчете тепловые потери в 20% от тепла, выделенного при горении C до CO_2 в топке, кроме потерь в шлаке, уноса и пр., вне зависимости от конструкции топки—условны.

Указанные условности требуют очень осторожной оценки расчетного состава полугаза. Поэтому при проектировании новых топок в основу должен быть положен состав полугаза, практически получаемого в топках в условиях опытных испытаний, однако теоретические расчеты должны оказать помощь в выявлении влияния отдельных факторов, которые способствуют улучшению состава полугаза.

СОСТАВ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ИЗ УСЛОВИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Кроме изложенного в разделе II взгляда по вопросу о методике расчета полугенераторного газа, целесообразно применить к расчету полугенераторного газа условия физико-химического равновесия. С этой целью выполнено 5 групп расчетов тепловых характеристик полугаза для топлива одного и того же состава в предположении различных условий образования полугаза.

Расчеты выполнены для топлива Хакасского месторождения Восточной Сибири следующего состава:

$C^p = 59,2 \%$	
$H^p = 4,12\%$	Летучих на горючую массу
$O^p = 9,21\%$	$V^2 = 41\%$
$N^p = 1,75\%$	или на рабочую массу
$S^p = 0,75\%$	$V^p = 30,8\%$
$A^p = 14,00\%$	
$W^p = 11,00\%$	
100%.	

Исходными условиями, положенными в основу вычислений тепловых характеристик полугаза, являются:

Для I и II группы расчетов:

а) влага топлива и конституционная влага Дюлонга реагируют с CO , образуя CO_2 и H_2 по реакции



б) в полугаз переходит свободный водород,

в) теплосодержание полугаза при $1000^\circ C$ в первом случае и при 1100° во втором случае обусловлено расходом 70% тепла, выделенного в зоне газификации, остальные 30% — тепловые потери.

Для III группы расчетов учтены предварительно продукты сухой перегонки, причем принято, что:

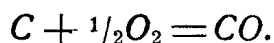
а) 10% элементарного кислорода топлива переходит в углекислоту по реакции



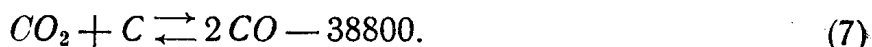
б) 50% элементарного кислорода топлива переходит в водяные пары по реакции



и остальное количество кислорода (40%) участвует в образовании окиси углерода в продуктах сухой перегонки по реакции



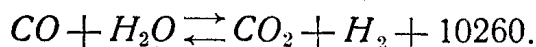
Оставшийся свободным углерод сгорает до CO_2 , последняя восстанавливается до CO по уравнению равновесия



Вычислив константу равновесия $K = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}^2}$ для температуры $1000^\circ C$ из уравнения Будуара

$$\ln K = 21,4 - \frac{21000}{T}, \quad (8)$$

которая для этой температуры равна $K = 133$, получаем количество CO_2 и CO в момент равновесия в зоне газификации (зона очага горения и восстановления). Но в газовой фазе температура снижается от $1000^\circ C$ до $820^\circ C$ вследствие испарения влаги топлива и химических реакций. При температуре $820^\circ C$ в газовой фазе образуется новая равновесная система



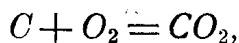
Вычислив константу равновесия $K = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} P_{H_2}}$ для температуры $820^\circ C$ из уравнения Вант-Гоффа

$$\ln K = -\frac{2226}{T} - 0,0003909 T + 2,4506, \quad (9)$$

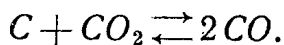
которая (константа) для этой температуры равна $K = 0,896$, получаем окончательный состав полугаза в момент равновесия; этот состав полугаза приведен в таблице II (группа III). Расчеты по этому методу далеки от точных ввиду того, что не учитываются скорости реакции.

Для IV группы расчетов принято во внимание время соприкосновения углекислоты с раскаленным углеродом при протекании CO_2 через слой топлива. При скорости движения газов $0,8 \text{ м/сек}$ время прохождения газами слоя топлива может быть принято приблизительно $1,5 \text{ сек}$.

В зоне очага горения топки имеет место реакция



практически совершающаяся мгновенно. Скорость этой реакции—исчезновение свободного кислорода—равна $0,0036 \text{ сек}$. Полученная углекислота восстанавливается до CO по реакции



Скорость реакции в направлении образования CO выражается уравнением

$$K_1 \tau = \frac{2,3}{\frac{1+m}{2}} \lg \left(\frac{1}{m - \frac{1+m}{2} x} \right) \quad (10)$$

(см. Хаслам и Руссель „Топливо и его сжигание“, стр. 78).

Здесь τ — время соприкосновения CO_2 с C в *сек*,

m — содержание CO_2 в газе в начале реакции восстановления при $\tau=0$,

x_1 — содержание в газе CO по истечении времени τ ,

K — удельная скорость реакции.

Для определения x необходимо знать K и m .

Значение K_1 по Клемент, Адамсу и Хаскинс (Хаслам и Руссель. „Топливо и его сжигание“) для температуры очага 1200° при условии газификации антрацита

$$K_1 = 0,237;$$

очевидно, значения K_1 , взятые для антрацита, более подходят, чем значения K_1 для кокса. Значение m при $\tau=0$, т. е. в начальный момент реакции восстановления углекислоты $= 1$. Тогда при $\tau = 1,5$ *сек*, решая уравнение относительно x , получим

$$x = 0,30,$$

т. е. в составе реакционного газа $CO_2 = 70\%$ и $CO = 30\%$.

Восстановление углекислоты совершается на 30%.

Учтя азот воздуха, получим окончательный состав газа в очаге горения

$$\begin{aligned} CO &= 7,10\% \\ CO_2 &= 16,4\% \\ N_2 &= 76,5\% \end{aligned}$$

Если учесть продукты сухой перегонки расчетом, аналогично проведенным в III группе, тогда окончательный состав газа выразится в объемных процентах

$$\begin{array}{ll} CO = 7,13 & H_2S = 0,12 \\ CO_2 = 14,35 & N_2 = 66,44 \\ H_2 = 7,90 & \hline H_2O = 4,06 & 100\% \end{array}$$

что и приведено в графе IV таблицы II.

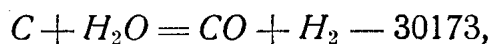
Однако, если составить тепловой баланс топки и принять (как обычно), что 5% от теплотворной способности топлива составляют потери от механической неполноты горения (провал, выгреб, в шлаке) и 30% от тепла, выделенного в очаге горения на тепловые потери кладкой топки, тогда температура очага горения равнялась бы $1450^\circ C$. Но в очаге горения полугазовой топки такую температуру допустить нельзя. Понижение температуры достигается насыщением воздушного дутья влагой. В полугазовых топках обычно с этой целью в поддувало топки всегда наливается вода. Влияние воды в поддувале выяснено в следующей 5-й группе расчетов.

V группа расчетов основана на следующих предположениях:

1) Все положения, принятые в IV группе расчетов, имеют место и в этой группе.

2) Избыточное тепло, выделяющееся в результате экзотермических реакций, расходуется на эндотермические реакции разложения водяного

пара в слое топлива, нагретого до высокой температуры. Благодаря этому понижается температура очага горения от 1450° (см. IV группу расчетов) до 1200°C . При помощи простых расчетов определяется избыточное тепло, как разность между количеством выделившегося тепла по реакциям образования CO_2 , CO , H_2O и количеством тепла, пошедшего на нагревание газа до заданной температуры. Поделив избыточное количество тепла на теплоту реакции разложения водяного пара



определяется количество разложенного водяного пара (из расчета на первоначальную принятую весовую единицу топлива, например, на 100 кг).

3) Но разложение водяного пара не происходит нацело, устанавливается равновесная система между H_2O , CO и H_2 , поэтому количество подводимого водяного пара не равно количеству разложенного водяного пара, первое больше второго. Разложение (восстановление) водяного пара совершается в 2,18 раза медленнее восстановления углекислоты CO_2 , при этих же температурных условиях и при одинаковом времени соприкосновения CO_2 и H_2O с раскаленным коксом. В нашем частном случае CO_2 восстанавливается на 30% (см. IV группу расчетов), значит разложение H_2O происходит в количестве

$$\frac{30}{2,18} 100 = 13,8\%.$$

Остальное количество водяного пара

$$100 - 13,8 = 86,2\%$$

проходит через кокс неразложенным. Зная абсолютное количество разложенного водяного пара по избыточному теплу, определяется количество неразложенного водяного пара и, следовательно, общее количество водяного пара, которое должно быть подведено к очагу газификации в слое топлива.

Таким образом, рассчитан состав полугенераторного газа (влажного) для очага газификации в слое топлива. Состав полугазов приведен в пункте А группы V таблицы II.

4) В пункте В группы V таблицы II приведен состав полугаза с учетом продуктов сухой перегонки и газа, полученного в очаге горения. Определение количества и состава газов сухой перегонки указано ранее. Расчет состава газа сделан по влажному газу.

В пункте С группы V приведен состав полугаза при температуре в очаге горения 1200°C , рассчитанный на сухой газ.

Составы газов по пунктам В и С являются составами газов, рассчитанными на основе условий физико-химического равновесия при 1200°C . При иных температурных условиях составы влажного и сухого газов будут иными, но методика остается неизменной.

5) Возникает вопрос, как подвести в топку водяной пар? В полугазовых топках в поддувало наливается вода, насыщающая первичный воздух.

Для нашего случая необходимо иметь воздух, полностью насыщенный водяными парами при 78°C . При холодном первичном воздухе такие условия насыщения невозможны, насыщение значительно меньше, недостающее количество водяного пара получается вследствие испарения воды в поддувале топки при помощи тепла остывающего шлака топлива, который по мере выгорания топлива опускается по ступенчатым колосникам в поддувало топки.

Все выполненные расчеты над топливом одного и того же состава приведены в таблице II.

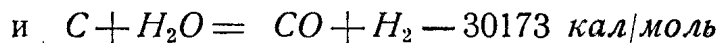
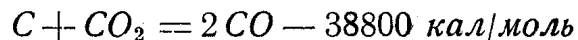
Таблица II

Тепловые характеристики полугенераторного газа, вычисленные для различных условий образования его.

№№ пп.	Характеристика полугенераторного газа	Размерность	Группы расчетных условий						
			I	II	III	IV	V группа		
							A	B	C
1	Температура полугаза	°C	1000	1100	820	1200	1200	1200	1200
2	Состав полугаза	Объемные %	15,00	11,39	26,18	7,13	8,85	8,75	12,00
	CO ₂								
	CO		11,4	13,62	3,49	14,35	10,50	9,45	13,00
	H ₂		14,22	13,50	14,27	7,90	4,35	10,50	14,50
	SO ₂		0,06	0,6	—	—	—	—	—
	N ₂		59,32	61,43	53,59	66,44	49,30	4370	60,36
	H ₂ S		—	—	0,16	0,12	—	0,1	0,14
	H ₂ O		—	—	2,31	4,06	27,0	27,50	—
3	Теплотворная способность	$\frac{\text{кал}}{\text{н.м}^3}$	821	695	1162	422	—	535	737
4	Физическое тело полугаза	$\frac{\text{кал}}{\text{н.м}^3}$	344	387	260	430	—	464	415,5
5	Общая теплота полугаза	$\frac{\text{кал}}{\text{н.м}^3}$	1165	1080	1422	852	—	999	1152,5
6	Выход полугаза на 1 кг топлива	$\frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}}$	4,2	4,44	3,59	4,95	—	5,85	4,25
7	Количество первичного воздуха на 1 кг топлива	$\frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}}$	3,14	3,42	2,42	3,88	—	2,56	—
8	Количество водяного пара на 1 кг топлива	$\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$	—	—	—	—	—	1,31	—
9	Степень разложения водяного пара	%	—	—	—	—	—	13,8	—

СЛОЙ ТОПЛИВА В РЕАКЦИОННОЙ ЗОНЕ ТОПКИ.

В реакционной зоне топки (горение C и восстановление CO₂ и H₂O) теплота, необходимая для завершения эндотермических реакций



должна быть аккумулирована слоем топлива в процессе экзотермической реакции $C + O_2 = CO_2 + 97650 \text{ кал/моль}$.

Это непрерывно аккумулируемое тепло также непрерывно расходуется. Слой топлива должен иметь постоянную высокую температуру—температуру реакционной зоны и быть достаточным, чтобы компенсировать теплоту эндотермических реакций.

Очевидно, количество топлива, нагретого до температуры реакционной зоны, находится в определенной зависимости от двух факторов: во первых, от температуры зоны, во вторых—от состава газа (конечно имеет место и обратная зависимость).

Если обозначить через Q₁ тепло реакции восстановления CO₂ в пересчете на 100 кг газифицируемого угля; через Q₂ тепло реакции разложения H₂O в пересчете на 100 кг газифицируемого угля; через G вес топлива, на

гретого до температуры реакционной зоны в пересчете на 100 кг газифицируемого топлива, то

$$Q_1 + Q_2 = G ct,$$

$$G = \frac{Q_1 + Q_2}{Ct} \text{ кг/100 кг газ. т.} \quad (11)$$

Высота слоя топлива, нагретого до температуры реакционной зоны, находится в зависимости от интенсивности газификации, т. е. от напряженности поверхности колосниковой решетки.

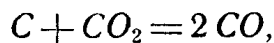
Если напряженность поверхности колосниковой решетки B/R кг/м² час, тогда при насыпном весе топлива γ толщина слоя топлива выразится

$$H = \left(\frac{B}{R} : \gamma \right) \cdot \frac{G}{100} \text{ м} \quad (12)$$

Покажем применение выведенных соотношений на конкретном примере для состава газа по пункту В (или С) группы V, таблицы II.

$$Q = \frac{1}{2} x_{co} \cdot Q_{co}.$$

Здесь x_{co} — количество молей CO в результате реакции



$$Q_1 = \frac{1}{2} 1,345 \cdot 38790 = 26000 \text{ кал/100 кг топлива,}$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} y_{(co + H_2)} \cdot Q_{(co + H_2)}.$$

Здесь $y_{(co + H_2)}$ — количество молей CO и H₂ в результате реакции $C + H_2O = CO + H_2 = 30173$.

$$Q_2 = \frac{1}{2} (1,3 + 1,3) 38800 = 39000 \text{ кал/кг топлива.}$$

Определяем G — вес нагретого топлива в реакционной зоне на 100 кг газифицируемого

$$G = \frac{Q_1 + Q_2}{Ct}.$$

Здесь C — теплоемкость топлива,
 t — температура реакционной зоны.

$$G = \frac{26000 + 3900}{0,25 \cdot 1200} = \frac{65000}{300} = 217 \text{ кг/100 кг топлива.}$$

Полученное соотношение показывает, что величина G количество нагретого топлива должно быть тем более, чем более восстановление CO₂ и H₂O и чем менее температура реакционной зоны.

Высота слоя топлива

$$H = \left(\frac{B}{R} : \gamma \right) \cdot \frac{G}{100} \text{ м;}$$

для нашего примера, если принять

$$B/R = 80 \text{ кг/м}^2 \text{ час и } \gamma = 700 \text{ кг/м}^3,$$

тогда

$$H = \frac{80}{700} \cdot \frac{217}{100} = 0,25 \text{ м} \rightarrow 250 \text{ мм.}$$

Если принять $B/R = 100 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$, то при том же составе полугаза и той же температуре высота слоя топлива выразится

$$H = \frac{100}{700} \cdot \frac{217}{100} = 0,31 \rightarrow 310 \text{ мм.}$$

В дальнейшем не представит особых затруднений определение конструктивных размеров полугазовой топки расчетным (теоретическим способом), учитывая процесс подсушки и сухой перегонки топлива.

Вопросы о конструкции полугазовой топки и о методах расчета геометрических размеров топки будут освещены в следующей работе.

ВЫВОДЫ.

1) В статье выполнен сравнительный анализ отопления печей полугазом, генераторным газом и при помощи топок полного горения.

2) Существующие алгебраические (статистические) методы расчета полугаза условны; в статье приведен физико-химический метод расчета состава полугаза при различных исходных условиях.

3) В статье приведен метод расчета толщины слоя топлива в реакционной зоне полугазовой топки.

Выполненный конкретный расчетный анализ позволяет сделать общее заключение о близкой сходимости результатов теоретического расчета и с данными производственного опыта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник конструктора печей. Стальпроект. ОНТИ, НКТП. Москва, 1935.
2. Проф. Чернобаев.—Топливо, его сжигание и общие методы расчета заводских печей 1936.
3. Инж. Иссерлис.—Шахтные печи. ОНТИ, НКТП. Киев, 1936.
4. Хаслам и Руссель.—Топливо и его сжигание. ОНТИ, Москва, 1934.