

**АВТО
ТРАКТОРНОЕ
ДЕЛО**

ЖУРНАЛ ГУТАП и НАТИ

**АВТО
ТРАКТОРНОЕ
ДЕЛО**

ЖУРНАЛ

**Газогенераторы
в журнале
«Автотракторное
дело»**

3 м а р т
1933

**АВТО
ТРАКТОРНОЕ
ДЕЛО**

ЖУРНАЛ ГУТАП и НАТИ

**АВТО
ТРАКТОРНОЕ
ДЕЛО**

ЖУРНАЛ ГУТАП и НАТИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВИАЦИОННОЕ И
АВТОТРАКТОРНОЕ



5 м а й - и ю н ь
1933

1933

7
1933

Аналитический расчет основных размеров транспортных газогенераторов

Чрезвычайно жесткие условия габаритного порядка в легком газогенераторе транспортного типа выдвигают на первое место вопросы теоретического обоснования его основных размеров. Несмотря на вековой опыт эксплуатации стационарных установок, газифицирующих твердое топливо, до сих пор не выработаны аналитические методы определения важнейших характеристических величин агрегата. Нет формул, вскрывающих взаимную связь этих величин, а имеющиеся эмпирические зависимости являются разрозненными.

Основными конструктивными размерами легкого газогенератора, работающего по принципу обратного горения, являются:

1. Высота активной зоны H .
2. Площадь колосниковой решетки.
3. Диаметр шахты и отношение $\frac{H}{d}$.

Кроме того, важное значение имеют диаметр воздушных фурм, объем бункера и т. д.

Определение H , значение и расчет

Высотой активной зоны данной конструкции называется расстояние от верхних фурм до колосниковой решетки. Величина активной зоны является одним из основных факторов, влияющих на качество газа, и может быть для данного агрегата переменной, если конструкция предусматривает изменение положения колосниковой решетки или подвода воздуха. Фактически зона газификации располагается несколько выше уровня верхних фурм, а зона восстановления не доходит непосредственно до колосниковой решетки, так как продукты газификации, подлежащие восстановлению, благодаря засасывающей силе двигателя стремятся выйти из слоя раскаленного угля по более коротким путям. Кроме того, на колосниках скапливается обычно зола, не обладающая никакой реактивной способностью.

Кроме высоты зоны данной конструкции, которую мы для краткости назовем конструктивной высотой зоны H_k , необходимо еще ввести понятие о термохимической высоте активной зоны H' , определяющей собою при данных условиях химический состав газа.

Активная зона представляет сумму высот двух зон—зоны горения h_1 и зоны восстановления h_2 .

Высота активной зоны:

$$H = h_1 + h_2 \quad (1)$$

есть величина переменная и зависит от целого ряда самых разнообразных факторов.

Термохимическая высота активной зоны есть высота того слоя топлива, в котором происходят реакции горения и восстановления. Суммируя и классифицируя условия, влияющие на эту величину, мы можем сказать, что высота активной зоны зависит от двух основных причин: 1) скорости движения газообразных продуктов в камере сгорания газогенератора и 2) скорости идущих в ней химических реакций. Все остальные факторы влияют лишь на величину этих скоростей и таким образом могут быть названы косвенными. Эти причины чрезвычайно разнообразны и многочисленны, так же как и характер и степень их влияния. Часть их оказывает влияние на какую-нибудь одну из скоростей, часть влияет на обе, усложняя, таким образом, анализ и методику расчета.

Основные из этих факторов следующие:

1. Рабочий режим генератора, т. е. напряжение колосниковой решетки, или, что то же самое, отбор газа в единицу времени.
2. Размер газогенератора.
3. Температура и влажность первичного воздуха и влажность газифицируемого топлива.

4. Площадь сечения камеры сгорания и отношение $\frac{H}{d}$.

5. Реактивная способность топлива.

6. Величина кусков топлива.

7. Род топлива.

8. Температура и давление внутри камеры сгорания.

Все эти условия суммируя определяют собою высоту термохимической активной зоны, т. е. определяют область, в которой идут основные реакции газогенераторного процесса.

Может возникнуть вопрос, для чего нужен учет всех этих факторов, если он так сложен и продолжителен.

Для того чтобы ответить на этот вопрос, посмотрим, какие взаимоотношения существуют между конструктивной и термохимической

высотами зон. Предположим, что при нормальном режиме генератора создаются условия, при которых высота зоны равна H_k , что получится если $H_k < H$.

Очевидно, величина H_k будет недостаточна для того, чтобы реакции восстановления успели бы закончиться на ее протяжении, и часть продуктов газификации, не успевших восстановиться, выйдет из генератора, увеличив в газе процентное содержание CO_2 и H_2O .

Если $H_k < H$, то, следовательно, $H - H_k$ есть та величина, которой не хватает конструктивной высоте зоны, чтобы быть равной термохимической.

Если v скорость движения газа в камере сгорания в м/сек, то время, в течение которого продукты газификации должны были бы еще находиться в слое раскаленного топлива, равно:

$$t = \frac{H - H_k}{v} \text{ сек.} \quad (2)$$

При средней скорости реакции восстановления, равной w м³/сек, получим количество продуктов, не успевших восстановиться благодаря недостаточной величине конструктивной высоты зоны:

$$q = wt = \frac{(H - H_k)w}{v} \text{ м}^3 \quad (3)$$

при $H = H_k$, $q = 0$.

Ясно, что необходимо стремиться к максимальному уменьшению разности $H - H_k$, так как в этом случае растет количество восстановленных компонентов генераторного газа. Конструктивная высота зоны должна быть равной термохимической и во всяком случае не должна быть меньше ее.

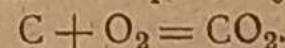
На практике, при недостаточной величине H_k , генераторный газ содержит такое огромное количество CO_2 (16—18%), что агрегат перестает быть по существу газогенератором, а превращается в обыкновенную печку. Теплотворная способность газа резко понижается, и газ не горит. Таким образом генератор делается совершенно негодным для работы.

В настоящее время при конструировании легкого газогенератора высота активной зоны не рассчитывается, а выбирается «на-глазок» на основании немногочисленных конструкций, находящихся в эксплуатации.

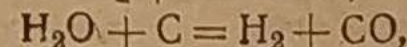
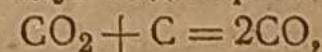
Не останавливаясь на физико-химическом анализе явлений, происходящих в газогенераторе, так как это не входит в задачи настоящей статьи, отметим лишь, что эти явления, несмотря на внешнюю простоту агрегата, отличаются чрезвычайной сложностью и запутанностью, так что во многих основных вопросах процесса газификации в настоящее время не достигнуто необходимой ясности и четкости.

Основные реакции схематизированного газогенераторного процесса следующие.

В зоне горения происходит сгорание углерода по формуле:



В зоне восстановления идут эндотермические реакции:



данные продукты необходимы для работы двигателя.

Вывод основной формулы

Формулу, определяющую высоту активной зоны, можно вывести, взяв за основу кинематические представления. Можно рассматривать высоту активной зоны как результат взаимоотношений двух скоростей—скорости продвижения газа в камере сгорания и скорости химических реакций. Скорость движения газа, измеряемая в м/сек, определяет время, в течение которого продукты, подлежащие восстановлению, будут находиться в камере сгорания. Скорость реакции восстановления, измеряемая в м³/сек, показывает нам действительно необходимое время, в течение которого продукты, подлежащие восстановлению, должны находиться в слое раскаленного топлива. Эти сроки должны совпадать. На этом условии и построен вывод формулы, представляющей как бы линию пересечения двух плоскостей: кинематики и химии.

Предположим, что в зоне горения выделяется A м³ веществ, подлежащих восстановлению. Кроме того, в единицу времени через зону восстановления пройдут B м³ продуктов, которые не будут

участвовать в реакциях восстановления. Это будут некоторые продукты сухой перегонки: азот воздуха и т. д.

Если площадь сечения зоны восстановления равна $F \text{ м}^2$, а коэффициент заполнения зоны топливом равен μ , то живое сечение камеры сгорания в поясе восстановления равно $\mu F \text{ м}^2$.

Тогда скорость прохождения всех продуктов сгорания через зону восстановления будет:

$$v = \frac{A+B}{\mu F} \text{ м/сек.} \tag{4}$$

С другой стороны, если искомая высота зоны восстановления равна h , время, в течение которого $A \text{ м}^3$ могут прореагировать с углеродом, равно $t \text{ сек.}$, а скорость движения газов попрежнему v , то должно существовать равенство:

$$v = \frac{h}{t} \tag{5}$$

или

$$\frac{A+B}{\mu F} = \frac{h}{t},$$

откуда

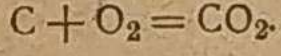
$$h = \frac{(A+B) t}{\mu F} \tag{6}$$

Из этой формулы ясно, что h есть функция скорости реакции, идущей в зоне восстановления.

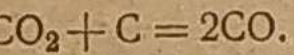
Соотношение (6) справедливо, если компоненты, входящие в правую часть формулы, постоянны. В действительности же эти величины изменяются и на разных расстояниях от колосниковой решетки имеют различное значение. Рассмотрим причины и закон, по которым эти изменения происходят.

Множитель $(A+B)$ представляет собой сумму двух слагаемых; A —как мы уже говорили—это количество кубометров газообразных продуктов, получающихся в зоне горения в единицу времени и подлежащих восстановлению.

При данном напряжении колосниковой решетки эта величина для зоны горения будет постоянна, но по мере продвижения газообразных продуктов через слой раскаленного топлива A начнет меняться в сторону уменьшения. В месте подвода первичного воздуха, в плоскости фурм располагается зона окисления. Углерод топлива сгорает в углекислоту по реакции:



Эта реакция происходит простым приложением молекулы кислорода воздуха к атому углерода, в то время как неполное сгорание может произойти только при расщеплении молекулы кислорода, на что необходимо затратить работу и время. Следовательно, в окислительной зоне будет максимум $A \text{ м}^3$, т. е. продуктов, подлежащих восстановлению. Но при соприкосновении CO_2 с раскаленным углеродом начинается реакция восстановления:



Эта реакция, как и все химические реакции, обратима, т. е. может протекать в обе стороны. Химикодинамическое равновесие устанавливается в зависимости от целого ряда внешних условий. Согласно принципу ле-Шателье, это равновесие сдвинется вправо тем больше, чем ниже будет давление и выше температура. Количество восстановившейся углекислоты по мере приближения газа к колосниковой решетке будет расти, достигнув некоторого максимума на определенной высоте камеры.

Плоскость, дальше которой восстановление при данных условиях не происходит, есть конец восстановительной зоны. Если рабочий режим генератора нормален и конец восстановительной зоны располагается около колосников, значит конструктивная высота зоны данного агрегата совпадает с истинной термодинамической высотой активной зоны. Итак, величина A будет уменьшаться пропорционально уменьшению количества CO_2 и H_2O , достигнув нуля в конце восстановительной зоны. Величина B будет расти пропорционально увеличению количества CO . Но $(A+B)$ измеряют в $\text{м}^3/\text{сек.}$ при восстановлении же одного объема CO_2 мы получаем два объема CO . Следовательно, B будет расти скорее, чем A , уменьшится и сумма $(A+B)$.

Величина t обратна скорости реакции. Чем больше t , тем меньше скорость реакции восстановления, и наоборот. Следовательно, t будет изменяться под влиянием тех же факторов, что и скорость восстановительного процесса. Эта скорость, как известно, зависит от температуры, давления и концентрации реагирующих веществ. Изменение концентраций есть в сущности изменение слагаемых суммы $(A+B)$, о котором мы уже говорили. Согласно закону действующих масс, скорости реакции $CO_2 + C = 2CO$ равны w_1 и w_2 и выражаются следующим уравнением.

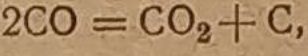
При течении реакции слева направо

$$w_1 = K_1 (C_{CO_2}).$$

При течении справа налево

$$w_2 = K_2 (C_{CO})^2.$$

Величина t выражает время, потребное для того, чтобы $A \text{ м}^3$ продуктов, подлежащих восстановлению, прореагировало с углеродом. Следовательно, t есть величина обратная w_1 (если речь идет только о восстановлении CO_2). Как же изменяется w_1 по высоте камеры сгорания?—В плоскости окислительной зоны, где количество CO_2 велико и отношение концентраций, участвующих в реакции продуктов, далеко от положения равновесия, w_1 намного более w_2 , а реакция бурно идет в сторону восстановления. Следовательно, в этой плоскости t —минимальное. По мере образования CO начинается обратная реакция:



скорость которой w_2 растет. С увеличением количества CO w_1 уменьшается и t растет, достигая своего максимума.

Величина F постоянна в том случае, если камера сгорания представляет собой цилиндр или образована вертикальными плоскостями. Но на практике очень часто делают камеру конической формы или в виде четырехгранной пирамиды с разными основаниями. В этом случае F будет переменным.

Зная угол наклона образующей конуса, не трудно найти зависимость между площадью сечения и высотой камеры сгорания. Кроме того, можно подсчитать зависимость между скоростью движения газа по высоте камеры и скоростью уменьшения сечения.

Множитель μ является коэффициентом, показывающим, какая часть сечения камеры осталась незаполненной топливом. Поэтому его правильней назвать коэффициентом незаполнения камеры или коэффициентом живого сечения. Строго говоря, и эта величина не является постоянной по высоте слоя топлива. Главным фактором, влияющим на μ , является величина кусков газифицируемого топлива. Чем крупнее куски топлива, тем больше μ . Кроме того, μ зависит от рода топлива. При одинаковой величине кусков μ будет больше для древесного угля, чем для каменного и т. д.

У колосниковой решетки топливо обычно мельче, чем у фурм, поэтому по высоте камеры μ будет уменьшаться от фурм к колосниковой решетке.

Величина μ зависит также от режима газогенератора и от формы камеры сгорания. Если рабочий режим не соответствует нормальным условиям для данного агрегата, а форма камеры сгорания не приспособлена к газифицируемому топливу, то имеет место явление, именуемое на практике «сводами». В слое топлива получают пустые, ничем не заполненные места, и здесь, конечно, ни о каком постоянстве μ говорить не приходится. Эти пустоты ведут к нарушению правильности процесса газификации, что сейчас же сказывается на химическом составе газа. Практически величину μ можно подсчитать, зная сыпной и удельный вес топлива.

Тогда μ получится как разность:

$$\mu = 1 - \frac{G}{\gamma \cdot 1000}, \tag{7}$$

где G —сыпной вес в кг/м^3 ,
 γ —уд. в.

$$\text{Отношение } \frac{H}{d}$$

При выборе геометрических размеров камеры сгорания может явиться вопрос, какое отношение высоты активной зоны к ее диаметру наиболее рационально.

Считая объем камеры постоянным, мы можем себе представить целую гамму изменений величины $\frac{H}{d}$, причем это изменение будет активно влиять на процессы, происходящие в шахте. Практически в существующих конструкциях генераторов мы имеем следующие величины интересующих нас размеров.

Таблица 1

№ п/п	Конструкция генератора	Топливо	Число рядов фурм	Расст. между рядами	Расст. нижн. ряда фурм до края камеры в мм	Расст. до решетки	Площадь сечения нижн. камеры	$\frac{H}{d}$
1	Берлие (1925)	Дрова	1	—	160	240	$d = 120$	1,25
2	НАТИ II	Дрова	1	—	230	340	$d = 310$	1,33
3	НАТИ III	Дрова	1	—	130	300	$d = 192$	—
4	НАТИ IV	Дрова	2	65	255	330	70×1100	—
5	Рекс (Rex)	Древесн. уголь	1	—	472	472	$d = 420$	1,42

Таким образом практически отношение $\frac{H}{d}$ колеблется от 1,12 до 1,33.

Найдем отношение $\frac{H}{d}$ (для случая цилиндрической формы шахты) математическим путем.

Если H —высота активной зоны в метрах, v —скорость движения газов в камере сгорания в м/сек, а t —время, необходимое для того, чтобы закончилась реакция в зоне, то, как нам уже известно, должно существовать равенство:

$$H = vt.$$

С другой стороны,

$$v = \frac{A+B}{\mu F} = \frac{(A+B) 4}{\mu \pi d^2},$$

отсюда

$$\mu \pi d^2 v = 4(A+B),$$

$$d^2 = \frac{4(A+B)}{\mu \pi v},$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{A+B}{\mu \pi v}}.$$

Находим, чему равно отношение $\frac{H}{d}$:

$$\frac{H}{d} = \frac{vt}{2 \sqrt{\frac{A+B}{\mu \pi v}}} \quad (8)$$

Решая полученное уравнение относительно t , находим:

$$t = \frac{2 \sqrt{A+B} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)}{v \sqrt{\mu \pi v}} \quad (9)$$

С увеличением диаметра шахты отношение $\frac{H}{d}$ уменьшается. Скорость движения газов v также уменьшается, причем это уменьшение пропорционально квадрату диаметра зоны. Таким образом, в результате, при уменьшении отношения $\frac{H}{d}$ время t , в течение которого газы должны находиться в слое топлива, растет.

Найдем, чему равно время t в случае $\rho f v = w$.

Здесь f —живое сечение активной зоны $f = \mu F$, v —попрежнему скорость движения газов и w —скорость химической реакции, которую мы измеряем в м³/сек, ρ —процентное содержание в газе продуктов полного сгорания, подлежащих восстановлению:

Равенство $\rho f v = w$ можно переписать:

$$\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \mu v = \frac{1}{t},$$

откуда

$$\rho \pi d^2 \mu v t = 4.$$

С другой стороны, можно написать:

$$\mu \pi v = \frac{4}{t d^2 \rho}.$$

Подставив это выражение в ур-ние (9), получим:

$$t = \frac{2 \sqrt{A+B} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)}{v \sqrt{\frac{4}{t d^2 \rho}}} = \frac{H \sqrt{A+B}}{v \sqrt{w \rho}} \text{ сек.} \quad (10)$$

т. е. в случае соблюдения равенства $\rho f v = w$, время, необходимое для пребывания газов в активной зоне, пропорционально высоте зоны, обратно пропорционально скорости газов, обратно пропорционально корню квадратному из скорости реакции, помноженному на коэффициент ρ , и прямо пропорционально количеству кубометров газа, проходящих через зону в единицу времени.

Разберем, что представляет собой величина $\rho f v$. Произведение $f v$ есть не что иное, как расход газа через сечение активной зоны в единицу времени. Умножение на коэффициент ρ дает нам количество газообразных продуктов, подлежащих восстановлению, проходящих через живое сечение активной зоны в единицу времени. Следовательно, равенство $\rho f v = w$ есть условие, по которому расход исходных продуктов реакции должен быть равен скорости химической реакции. Таким образом выведенное равенство есть условие химико-динамического равновесия генератора.

Пользуясь только что выведенными формулами, сделаем полный проверочный расчет для древесноугольного генератора Рекс (Rex) французской конструкции.

Проверочный расчет Рекса

Основные размеры Рекса следующие:

$$H_k = 470 \text{ мм} \quad F \cong 0,139 \text{ м}^2$$

$$d = 420 \text{ мм} \quad V_h \text{ — рабочий объем камеры} = 65 \text{ л}$$

Мощность двигателя $N_e = 50 \text{ л. с.}$

Испытание, произведенное на Коломенском заводе с генератором системы Рише (Richet) и двигателем Гюльдера, показало, что можно считать затрату на 1 э. с. ч., равной 3485 кал.

Тогда при составе газа:

$$\begin{array}{ll} \text{CO} = 26,2\% & \text{H}_2 = 9,7\% \\ \text{CO}_2 = 3,7\% & \text{O}_2 = 0\% \\ \text{CH}_4 = 0,9\% & \text{N}_2 = 59,5\% \end{array}$$

и $H_u = 1123 \text{ кал/м}^3$ можно считать, что на 1 э. с. ч. необходимо затратить 3 м³ газа.

Тогда, пользуясь прежними обозначениями,

$$A+B = 3 \cdot 50 = 150 \text{ м}^3/\text{час} = 0,0416 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Значение $(A+B)$ взято для нижнего сечения камеры, т. е. при выходе из шахты генератора.

При $\mu = 0,5$ получаем:

$$v = \frac{A+B}{\mu F} = \frac{0,0416}{0,5 \cdot 0,139} = 0,61 \text{ м/сек.}$$

Время, в течение которого газы будут находиться в слое топлива:

$$t = \frac{H_k}{v}.$$

В случае правильно выбранной высоты конструктивной зоны H_k это время совпадает с химическим временем, т. е. интервал, в течение которого успеет закончиться процесс горения и восстановления в активной зоне:

$$t = \frac{0,470}{0,61} = 0,77 \text{ сек.}$$

Тогда отношение $\frac{H}{d}$ будет равно:

$$\frac{H}{d} = \frac{vt}{2 \sqrt{\frac{A+B}{\mu \pi v}}} = \frac{0,61 \cdot 0,77}{2 \sqrt{\frac{0,0416}{0,5 \pi \cdot 0,61}}} = 1,13,$$

т. е. расчет $\frac{H}{d}$ по формулам даст почти тот же результат, что непосредственное деление высоты активной зоны на ее диаметр.

При расходе газа 150 м³/час, или 0,0416 м³/сек генератор дает 26,2% окиси углерода, т. е. скорость получения окиси равна $\cong 10,9 \text{ л/сек.}$

Произведение fvt должно дать действительный рабочий объем камеры сгорания V_{hg} , т. е. объем, свободный от твердого топлива:

$$V_{hg} = fvt.$$

Подставляя значение членов правой части уравнения, получим:

$$V_{hg} = 0,0694 \cdot 0,61 \cdot 0,77 = 0,0325 \text{ м}^3.$$

Уже известный нам коэффициент μ связывает между собой величины V_{hg} и V_h , т. е. геометрического объема камеры сгорания, равного FH_k :

$$V_{hg} = \mu V_h.$$

Таким образом мы видим, что все вновь введенные нами характеристические данные связаны между собой рядом формул, определяющих их численное значение.

Возвратимся к определению физического значения равенства $\rho f v = w$. Схематизируя процесс, происходящий в камере сгорания генератора, мы можем мысленно представить себе, что физико-химическое взаимодействие имеется лишь между двумя веществами: воздухом и топливом, в результате чего и получаются генераторный газ. Как влияет скорость воздуха, проходящего через активную зону, на состав газа при H_k и $V_h = \text{const}$?

Реакции сгорания и восстановления совершаются во времени, поэтому как для зоны сгорания, так и для зоны восстановления должно существовать равенство: $h = vt$.

Если мы добились какого-то постоянства состава генераторного газа (при определенных p , V и T), то при $H = \text{const}$ (высота зоны не меняется), скорость газа v также должна быть равна постоянной величине.

Можно себе представить такую скорость воздуха, когда он не будет успевать реагировать с топливом и будет совершенно чистым выходить из камеры сгорания.

Это будет тогда, когда действительное время пребывания воздуха в активном слое топлива будет меньше необходимого «химического»

$$\text{времени } t_x = \frac{1}{w}.$$

Итак, при условии $t = \frac{H_k}{v} < t_x = \frac{1}{w}$ процесса газификации не будет происходить вовсе.

Наоборот, если скорость воздуха по сравнению со скоростью реакции чрезмерно мала, в камере будет наблюдаться явление, которое всегда имеет место при слишком малом отборе газа (или, что то же самое, при малом напряжении колосниковой решетки). При малой скорости воздуха и реакции пойдут очень медленно и между небольшими количествами реагирующих веществ. Поэтому в единицу времени будет выделяться такое небольшое количество тепла,

которое не в состоянии будет поддерживать в активной зоне минимальную температуру, необходимую для протекания реакций.

Таким образом и в этом случае реакции не пойдут, и воздух выйдет из камеры сгорания чистым без примеси продуктов газификации.

Итак, существуют две критические скорости воздуха v_{max} и v_{min} вне интервала которых реакции в генераторе прекращаются.

В этом интервале находится скорость, при которой к. п. д. установки получается наивысшим. Величина этой скорости определяется целым рядом факторов, в числе которых важную роль играют конструктивные особенности генератора.

Наивыгоднейшая скорость движения определяется из принятого нами условия химикодинамического равновесия генератора:

откуда

$$\rho f v = w,$$

$$v = \frac{w}{\rho f} \tag{11}$$

Итак, скорость движения газообразных веществ всего топлива для нормально установившегося процесса газификации, при котором установка дает максимальный термический эффект, равна средней скорости химической реакции, деленной на произведение коэффициента содержания продуктов, активно участвующих в процессе на живое сечение активной зоны.

Выведенное соотношение может служить проверкой правильности получения диаметра зоны. Докажем это примером.

Если q — удельный расход топлива в кг/л. с. ч.,
 N — необходимая мощность,
 R — напряжение колосниковой решетки в кг/м² час,
 Q — часовой расход топлива в генераторе,
 F — площадь сечения зоны,

то имеем следующее соотношение:

$$Q = qN,$$

$$F = \frac{Q}{R}.$$

С другой стороны, согласно принятому нами условию:

откуда

$$v = \frac{w}{\rho f},$$

$$F = \frac{w}{v \rho \mu}.$$

Таким образом для сохранения химикодинамического равновесия должно существовать равенство:

$$\frac{Q}{R} = \frac{w}{v \rho \mu} \tag{12}$$

Последнее уравнение может служить лишь для окончательной проверки полученных величин и является завершающим звеном динамического расчета генератора.

В практике стационарных установок, работающих по принципу прямого горения, отношение $\frac{H}{d}$ находится в зависимости от сорта горючего и от степени его спекаемости. Проф. Доброхотов приводит следующие данные.

Для жирных (по Грюнеровской классификации газов) углей высоту слоя топлива (т. е. H_k) делают равной половине внутреннего диаметра шахты, т. е.

$$H = \frac{d}{2}.$$

При газификации сухих длиннопламенных и тощих неспекающихся полуантрацитов — высоту слоя берут равной:

$$H = \frac{d}{1,5}.$$

При бурых углях высоту слоя делают равной диаметру активной зоны:

$$H = d.$$

Расчет высоты активной зоны

На основании выведенных соотношений можно построить схематический расчет высоты активной зоны.

При расчете высоты конструктивной зоны H_k необходимо исходить из основных характеристических показателей работы генератора. Конструктор должен задаться: 1) мощностью генератора, 2) родом топлива, 3) ориентировочным химическим составом газа. Все остальные величины, как, например: напряжение колосниковой решетки, скорость движения продуктов газификации в слое топлива и т. д. будут получены как результат сделанного нами выбора трех первых основных условий. Наметим примерную схему расчета высоты активной зоны.

Задание е. Рассчитать высоту активной зоны для генератора, работающего на древесном угле и питающего газом двигатель мощностью в 50 л. с. Желательно иметь следующий средний химический состав газа:

CO — 29% CO₂ — 2%
H₂ — 7% O₂ — 0%
CH₄ — 1% N₂ — 61%

Средняя теплотворная способность газа 1150 кал/м³.

При среднем выходе газа из древесного угля, равном 4,3 м³/кг, и при удельном расходе топлива, равном 0,7 кг/л. с. ч., находим количество топлива, которое должно быть затрачено в течение 1 часа в выбранном нами агрегате:

$$RF = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ кг/час},$$

где R — напряжение зеркала горения в кг/м² час,
 F — площадь сечения шахты; при цилиндрической форме камеры сгорания $F = \text{const}$ по всей высоте зоны.

При удельном расходе газа, равном 3 м³/э. с. ч., получаем, что для крайнего нижнего сечения шахты:

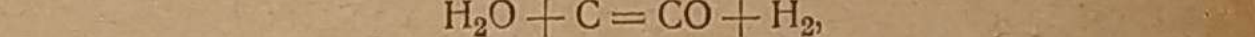
$$(A + B) = 3 \cdot 50 = 150 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Обозначения принимаются те же, что и при выводе основных формул.

Для получения среднего значения величин $(A + B)$ считаем, что вся окись углерода получена по реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Сделав это допущение, найдем, что 2х м³ CO в нижнем сечении зоны соответствуют х м³ CO₂ в верхней плоскости камеры сгорания.

Это допущение, упрощая расчет, дает достаточно точные результаты, избавляя нас от необходимости учитывать объемные изменения, происходящие при реакции водяного газа.

Если считать, что весь водород получен по реакции:



то, следовательно, каждому объему водорода соответствует один объем окиси углерода, полученный при разложении одного объема паров воды. Следовательно, объемное увеличение газовой фазы по этой реакции такое же, как и при восстановлении углекислоты. Считая, что вся CO получена в результате восстановления CO₂, мы, таким образом, сразу учитываем объемное изменение обеих реакций.

Итак, 29 объемным единицам CO при выходе из шахты соответствует 14,5 объемных единиц CO₂ в плоскости фурм.

При прежнем удельном расходе газа, величина $(A + B)$ для верхнего сечения будет равна:

$$(A + B)' = 2,56 \cdot 50 = 128 \text{ м}^3/\text{час},$$

откуда

$$(A + B)_{cp} = \frac{(A + B)' + (A + B)''}{2} = 139 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Коэффициент μ подсчитывается по выведенной нами формуле:

$$\mu = 1 - \frac{G}{\gamma \cdot 1000}.$$

Для древесного угля при $G = 180$ и $\gamma = 0,36$
 $\mu = 0,5.$

Средняя скорость движения газов всего топлива равна:

$$v = \frac{(A + B)_{cp}}{\mu F}.$$

Площадь сечения активной зоны F определяется следующим выражением:

$$F = \frac{35}{R},$$

где R — напряжение колосниковой решетки в кг/м² час.

Кроме того, при выборе F необходимо стремиться к наиболее рациональному соотношению $\frac{H}{d}$.

Для предварительного расчета F приводим практические величины напряжения колосниковой решетки в легких газогенераторах.

Для сравнения приводим напряжения, применяемые в газогенераторах стационарного типа.

Таблица 2

Род топлива	R в кг/м ² час
Древесн. уголь . . .	200—250
Дрова	700—1000

Таблица 3

Род топлива	R
Каменный уголь . .	100—150
Кокс	120—180
Буроугольн. брикет .	130—210
Торф	150—200

Приняв для нашего случая $R = 200$, имеем:

$$F = \frac{35}{200} = 0,175 \text{ м}^2,$$

откуда

$$V_{cp} = \frac{139}{0,5 \cdot 0,175 \cdot 3600} = 0,44 \text{ м/сек.}$$

Мы задались химическим составом газа, в котором содержание $\text{CO} = 29\%$ и $\text{CO}_2 = 2\%$. Это соответствует смеси CO и CO_2 со следующими концентрациями входящих в нее компонентов:

$$\begin{aligned} \text{CO} &= 93,4\%, \\ \text{CO}_2 &= 6,6\%. \end{aligned}$$

Подсчеты по формуле, аналогичной уравнению Будуара:

$$\ln \frac{C_{\text{CO}_2}}{(C_{\text{CO}})^2} = -\frac{19500}{T} + \text{const},$$

где C —концентрация вещества, дают следующие соотношения CO_2 и CO для равновесия реакции восстановления углекислоты в зависимости от температуры (см. табл. 4).

Таблица 4

Температура ° Ц	CO %	CO ₂ %
400	1	99
500	5	95
600	23	77
700	57	43
800	87	13
900	92	8
1000	99	1

Согласно этой таблице наша смесь соответствует температуре в 900° . Практически температура может быть несколько ниже. С уменьшением парциального давления равновесие реакции восстановления углекислоты сдвигается в сторону образования окиси углерода. Парциальное же давление смеси CO_2 и CO в условиях реального процесса газификации не равно единице, а значительно меньше. Парциальное давление кислорода воздуха, засасываемого двигателем через фурмы, равно:

$$p = 0,21 \text{ ат.}$$

Следовательно, если бы при горении получалась только углекислота, то ее парциальное давление также было бы равно $0,21$ ат, так как при реакции горения ($\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$) газовая фаза не меняет своего объема.

Если бы вся углекислота восстановилась в окись углерода, то парциальное давление возросло бы вдвое:

$$p = 0,42 \text{ ат.}$$

Итак, парциальное давление смеси CO_2 и CO лежит в пределах от $0,21$ до $0,42$ ат. Присутствие в смеси, кроме инертного азота воздуха, продуктов сухой перегонки, водорода, метана и т. д. сдвигает величину парциального давления к ее меньшему пределу, т. е. способствует образованию окиси углерода.

Выясним теперь, какое количество газообразных продуктов участвует в реакции.

В генераторном газе, химическим составом которого мы задались, содержание $\text{CO} = 29\%$. Следовательно, при заданной интенсивности горения газогенератор должен произвести $150 \cdot 0,29 = 43,5 \text{ м}^3/\text{час}$ окиси углерода.

Или, переходя к количеству восстановленной в единицу времени углекислоты, получаем:

$$q = \frac{150 \cdot 0,29}{3600 \cdot 2} = 0,016 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Если q —количество м^3 углекислоты, входящей в состав суммы $(A+B)$ и подлежащей восстановлению, w —скорость реакции восстановления при данной температуре угля $\text{м}^3/\text{сек}$, то время t пребывания газовой фазы в слое топлива получится как частное от деления первых двух величин:

$$t = \frac{q}{w}.$$

На основании опытов, произведенных Клементом и Адамсом, исследовавших скорость образования окиси углерода по реакции $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$, были получены следующие величины констант K' и K'' прямой и обратной реакции.

Для древесного угля.

Таблица 5

$K \backslash T$	800	850	900	925	1000	1100
K'	0,01968	0,07124	0,15400	0,2175	1,6404	1,495
K''	3,031	3,031	2,599	2,2980	4,708	5,275

Эти опыты дали возможность выразить соотношение K' и T следующим образом:

$$\ln K' = -\frac{50910}{T} - 0,0203 \cdot T + 65,376.$$

Для наших расчетов можно мысленно упростить механизм реакции. Реакция восстановления углекислоты ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$) явилась типичной гетерогенной и протекает между газообразной углекислотой и твердым углеродом топлива.

В реальных условиях процесса газификации концентрация твердого угля меняется крайне незначительно по сравнению с изменением газовой фазы. Это обстоятельство позволяет нам считать интересующую нас реакцию мономолекулярной и представить себе процесс восстановления CO_2 как явление, подобное диссоциации. Заменяв искусственно механизм восстановления механизмом распада молекулы CO_2 , мы можем применить к этому случаю основное уравнение молекулярных реакций.

В случае мономолекулярной реакции скорость разложения исходного вещества пропорциональна концентрации исходных молекул. Согласно общепринятым обозначениям, если a —исходное количество углекислоты, x —количество углекислоты, прореагировавшее за время t , то скорость реакции восстановления, по истечении времени t , пропорциональна оставшемуся количеству исходного продукта

$$\frac{dx}{dt} = k(a - x).$$

Будучи проинтегрировано от 0 до t , это уравнение дает количество успевшего прореагировать вещества:

$$x = a(1 - e^{-kt})$$

Количество вещества, еще не вступившего в реакцию, будет равно:

$$(a - x) = ae^{-kt}.$$

Величина k —постоянная скорости реакции, как известно, в сильной степени зависит от температуры, при которой реакция протекает. Но и при $T = \text{const}$, скорость реакции может быть не постоянной, если меняются концентрации веществ, участвующих в процессе. Будучи вначале максимальной, скорость реакции замедляется и асимптотически спадает до нуля по мере уменьшения концентрации исходных продуктов.

Таким образом средняя скорость процесса за время, в течение которого израсходуется взятая порция исходных веществ, будет равна:

$$w_{cp} = \frac{w_{max}}{2}.$$

w_{max} —скорость реакции в начале процесса равна ka .

Скорость реакции в любой момент t будет равна:

$$w = kae^{-kt}.$$

Величина k большей частью находится эмпирически или из уравнения Аррениуса:

$$\ln k = C - \frac{A}{RT}.$$

Графически это уравнение выражается в виде некоторой наклонной прямой, причем A будет тангенс угла наклона.

Зная величины k и a , находим скорость реакции восстановления.

При определенных нами условиях p и T средняя скорость реакции w , выраженная в $\text{м}^3/\text{сек}$, приблизительно равна $0,0056$ (по таблицам).

Тогда «химически необходимое» время пребывания газа в слое топлива равно:

$$t = \frac{q}{w} = \frac{0,006}{0,0056} = 1,06 \text{ сек.}$$

«Химическое» время должно быть равно действительному времени пребывания газа в активной зоне газогенератора:

$$t = \frac{H}{V},$$

отсюда

$$\begin{aligned} H &= tV_{cp} = 1,06 \cdot 0,44 = 0,47 \text{ м,} \\ H &= 470 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таким образом, пользуясь основными уравнениями химической кинетики и взяв за основу условие равенства «химически необходимого» времени и времени действительного пребывания газа в слое топлива, можно построить аналитический расчет основной характеристической величины газогенератора—высоты активной зоны.