

О НОВОЙ МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВОК

СМИРЕНСКИЙ В. Н.

Доцент, кандидат технических наук

Введение

Чем современнее оборудование котельной, тем все более затруднительной становится борьба за каждую долю процента экономии топлива. Это вполне понятно. Если на некоторых старых установках часто представляется возможным легко обнаружить часть причин, ведущих к перерасходу топлива, совершенно не прибегая к каким-либо исследованиям работы установки, то на более современных установках такие очевидные причины перерасходов топлива, как правило, отсутствуют. Но они могут здесь иметь место в скрытом виде, и для обнаружения их приходится прибегать к организации тщательных теплотехнических исследований котельной установки.

Анализ результатов подобного исследования позволяет наметить пути устранения отдельных недостатков в работе установки. Вместе с тем результаты исследования могут дать весьма ценный материал для работы эксплуатационному персоналу и для нового проектирования установок.

Однако существующие методы теплотехнических исследований работы котельных установок недостаточно совершенны, что объясняется целым рядом трудностей при разрешении большого числа вопросов, связанных с исследованием установки. Но все более и более усложняющаяся борьба за экономию каждой доли процента в расходе топлива, усложняющаяся вместе с совершенствованием техники, настойчиво требует и более глубокого исследования работы установок. Вполне понятным становится поэтому появление в последнее время ряда работ по методике исследования котельных установок как отдельных лиц, так и целых организаций, непосредственно заинтересованных в решении данных вопросов.

О надежности некоторых методов основных замеров при испытании котельных установок

Рассмотрим некоторые основные замеры и наблюдения при испытании котельной установки, точность которых остается весьма сомнительной. Для определения механической неполноты горения во время самого опыта необходимо определение количества и качества очаговых остатков и уноса. Отбор средней пробы и замер количества провала (при слоевом процессе) не представляет особых затруднений. Тщательное соблюдение правил по отбору средней пробы провала обычно дает уверенность в получении надежных данных о количестве горючих в нем. Отбор средней пробы шлаков для технического анализа их представляет уже известные затруднения. Чрезвычайная неоднородность в распределении горючих в шлаке заставляет соблюдать особую тщательность при отборе средней пробы

шлака. С увеличением мощности установки, т. е. с увеличением часового расхода топлива и с увеличением зольности топлива правильный отбор средней пробы шлаков еще более осложняется. Вообще же говоря, и здесь, как и с провалом, имеется полная возможность произвести и количественный учет и осуществить отбор пробы шлаков достаточно точно. Что же касается последней составляющей механического недожога—уноса, то здесь прежде всего мы сталкиваемся с невозможностью полного количественного определения его путем прямого замера. Для определения количества уноса весьма распространенным является метод золотого баланса, при применении которого необходимо бывает, в числе прочих данных, знать зольность уноса. Отбор средней пробы уноса осуществляется или из зольника последнего газохода установки, или улавливателями простейшего типа, или путем отсоса газа с одновременной сепарацией из него уноса. Не останавливаясь на первых двух упомянутых методах для отбора пробы уноса, так как в обоих этих случаях ясно, что только простая случайность может дать совпадение в составе отобранной пробы с действительной средней пробой уноса, рассмотрим несколько подробнее последний метод отбора пробы.

Наиболее совершенным в этом случае считают метод отбора пробы уноса с помощью трубки Альнера. Но, очевидно, надежных данных при этом методе ожидать нельзя. Рассчитывать на однородность по составу уноса нет никаких оснований.

Если взять какое-либо горизонтальное сечение в топке, то, рассматривая его, мы можем отметить здесь следующее.

а) Различие температур, что при прочих равных условиях приведет к более полному выгоранию уноса на участках с более высокими температурами.

б) Различие избытков воздуха в отдельных точках по сечению газохода. При этом в местах с большими избытками воздуха условия для окисления горючих уноса будут наиболее благоприятны при неизменности прочих условий (температура, скорость газов и т. д.)

в) Различие в скоростях движения газового потока, причем увеличение скоростей, т. е. сокращение времени пребывания частиц в топочном объеме, неизбежно будет вести к меньшему выгоранию горючих из уноса.

г) Наличие местных вихревых движений, что, увеличивая путь движения твердых частиц и время нахождения их в топочном пространстве, поведет к более полному выгоранию горючих в них.

Кроме того, для одной части уноса время нахождения его в топочном пространстве будет значительно короче, чем для другой, в силу того, что произойдет более раннее соприкосновение его с холодными поверхностями нагрева котла. В этом случае будет наблюдаться менее интенсивное выгорание уноса. Особенно будет это заметно у вертикально-водотрубных котлов.

При рассмотрении условий протекания уноса по газоходам мы опять сталкиваемся с целым рядом неясных моментов, не поддающихся учету при организации отбора средней пробы уноса: различие температур по сечению газохода, что имеет значение в первых газоходах, где возможно горение уноса, различие скоростей и степени концентрации уноса, выпадение уноса в самих газоходах, недоступных для отбора пробы, и т. п. Если учесть все изложенное выше, то станет понятной невозможность отбора средней пробы уноса с такой же степенью надежности, как это мы имеем для шлака и провала. Даже применяя предварительную тарировку сечения для определения степени концентрации уноса с помощью трубки Альнера, можно наметить точки отбора пробы лишь ориентировочно, так как степень и соотношение концентрации уноса в этих точках не будет оставаться неизменной с изменением режима работы топки.

Таким образом, вопрос о качественном и количественном определении уноса, даже при таком весьма усложняющем опыт методе, как применение трубок Альнера, остается крайне неопределенным и ненадежным.

Что касается подробного определения состава котельных газов, то можно указать на ненадежность такого анализа с помощью существующих типов газоанализаторов. Не останавливаясь здесь на подробном разборе причин этого, отметим, что для газов, богатых окисью углерода, водородом и углеводородами, подобный анализ дает результаты вполне достаточной точности, но в отношении котельных газов точность и надежность определения оставляют желать много лучшего. Бедность котельных газов горючими составляющими не позволяет применить к ним и метод калориметрирования с целью определения теплотворной способности их. Таким образом, газовый анализ дает достаточно надежные данные только в отношении содержания RO_2 и O_2 . Отсутствие надежных данных о составе в котельных газах горючих, характеризующих химическую неполноту горения, затрудняет анализ работы установки в этой части. Определение содержания CO по известной формуле также является ненадежным ввиду сказанного выше в отношении механического недожога.

Кроме разобранных выше двух несовершенных основных замеров по отбору пробы уноса и по подробному анализу газов, имеющих огромное значение для правильного сведения теплобаланса, при теплотехнических исследованиях котельных установок не меньшее значение имели бы и такие наблюдения, как определение объема газов и теплоотдачи во внешнюю среду. Осуществление этих замеров сразу облегчило бы правильное сведение теплового баланса котельной установки и позволило бы тем самым увереннее подойти к анализу результатов исследования. Но невозможность непосредственного замера количества газов и трудность и ненадежность применения в данном случае других методов по определению количества газов, с успехом применяемых в других условиях, вынуждают экспериментаторов отказаться от подобных наблюдений при испытаниях котельных установок. То же самое можно заметить и в отношении постановки замеров по определению теплоотдачи во внешнюю среду. Отсутствие этих замеров объясняется чрезвычайной трудностью учета всех потерь тепла от охлаждения кладки, металлических частей, выступающих из обмуровки, трубопроводов и пр. Все эти теплоизлучающие поверхности имеют различные температуры и самые разнообразные формы. Затем, кроме излучения, здесь также имеет место и конвективная передача тепла. Неопределенность некоторых расчетов, связанных с определением коэффициентов теплопередачи, делает невозможным и теоретический подсчет потери во внешнюю среду.

Новые предложения

Из предыдущего видно, что имеется еще достаточно слабых мест в части замеров при испытании котельной установки. То же получается и в расчетной части при сведении теплового баланса. В основном неточности при подсчетах теплобаланса могут произойти из-за неправильного учета несгоревших горючих и в первую очередь несгоревшего углерода C_m и затем несгоревшего водорода H_m . Остальные, не участвовавшие в горении горючие элементы топлива, имеют весьма незначительное влияние.

Неправильное определение C_m и недоучет H_m дает неверные результаты в подсчетах Q_4 , $V_{\text{сг}}$ и $V_{\text{вп}}$. Так как потери Q_2 и Q_3 находятся через объем газов, то и они будут определены неверно. Тогда и потеря Q_5 , как остаточный член баланса, получит также неправильное значение. Поэтому в целях уточнения и более правильного определения тепловых потерь приходится изыскивать какие-то новые дополнительные пути. Известно, на-

пример, что правильное определение объема газов внесло бы достаточную точность во все балансовые расчеты. Однако непосредственное определение объема газов, обычно применяемое в иных случаях замера расхода (по перепаду давлений, замеру скоростей и пр.), дающее там удовлетворительные результаты, здесь при испытании котельной установки не может быть осуществлено по целому ряду известных затруднений. Результаты такого замера были бы крайне ненадежны. Какие приемы могут наметиться для определения объема газов? Весьма простое решение вопроса можно получить в том случае, если-бы удалось, например, непрерывно вводить в одно из сечений газохода, где закончен уже процесс горения, какой-либо инертный газ, не имеющийся в составе дымовых газов. Замеряя его количество V_R $\text{м}^3/\text{час}$, предусматривая ввод в таком месте, чтобы до места забора газа на анализ произошло достаточно хорошее смешение его с основной массой газа и определяя процентное содержание его в сухих газах $R^0_{\text{о}}$, легко можно было бы найти $V_{\text{сг}}$ из равенства

$$V_{\text{сг}} B = \frac{V_R}{R} (100 - V_R) \text{ м}^3/\text{час},$$

откуда

$$V_{\text{сг}} = \frac{V_R (100 - R)}{RB} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1)$$

Для той же цели можно было бы использовать и ввод какого-либо газа из входящих в состав дымовых газов с применением простого анализа на RO_2 и O_2 . Но применение этих способов для определения объема газов встречает известные практические затруднения, так как требуется наличие какого-либо газа для дополнительного ввода его при проведении опыта.

Дополнительный ввод замеряемого воздуха, при наличии присоса, не дает возможности определить подобным же методом объем газов, хотя подобный способ представляется наиболее простым по своему осуществлению. Невозможность получения соответствующих уравнений в данном случае объясняется тем, что вместе с вводимым замеряемым количеством добавочного воздуха через неплотности и поры кладки подсасывается неучитываемый такой же по составу газ (воздух).

Но в некоторых случаях такой метод для определения объема газов может быть осуществлен.

А. Определение объема газов при помощи дополнительного ввода воздуха

Если имеется участок газохода, на котором отсутствует присос воздуха, то представляется возможным определить объем газа. Таким участком может, например, служить железная дымовая труба (см. рис. 1). Точки отбора газов на анализ и ввода дополнительного воздуха видны на чертеже.

В этом случае можно составить следующие балансовые уравнения для количества RO_2 и O_2 в точках А и С.

$$\frac{\text{RO}_2^c}{100} \left(V_{\text{сг}}^a + \frac{V_{\text{св}}}{B} \right) = \frac{\text{RO}_2^a}{100} V_{\text{сг}}^a \text{ м}^3/\text{кг}$$

и

$$\frac{\text{O}_2^c}{100} \left(V_{\text{сг}}^a + \frac{V_{\text{св}}}{B} \right) = \frac{\text{O}_2^a}{100} V_{\text{сг}}^a + \frac{V_{\text{св}} 21}{B 100} \text{ м}^3/\text{кг};$$

здесь $V_{св}$ обозначает часовое количество введенного воздуха в $\text{нм}^3/\text{час}$.
Из этих уравнений определяется объем газов

$$V_{сг}^a = \frac{V_{св} RO_2^a}{B(RO_2^a - RO_2^c)} \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (2)$$

или

$$V_{сг}^a = \frac{V_{св}(21 - O_2^c)}{B(O_2^c - O_2^a)} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (2')$$

Если анализ воздуха котельной дает содержание кислорода в нем отличное от 21%, то это должно быть учтено в соответствующем выражении для $V_{сг}^a$.

Выражения (2) и (2') просты. Для ввода воздуха не требуется какого-либо специального вентилятора. Ввод может быть осуществлен за счет

имеющегося разрежения в газоходе и дополнительного подсоса движением струи газа. Замер количества чистого воздуха, при соблюдении всех необходимых для этого условий, также не представляет каких-либо трудностей.

С изменением расхода газа количество вводимого воздуха также будет автоматически изменяться в том же направлении. Что касается анализа газов, то так как здесь необходимо лишь определение RO_2 и O_2 (или даже только одного из них), такой простой газовый анализ не представит никаких затруднений. Необходимо только иметь в виду, что замерено будет количество влажного воздуха $V_{вл}^B$ $\text{м}^3/\text{час}$ при соответствующей средней температуре t_b °C, среднем статическом разрежении в трубопроводе p_b

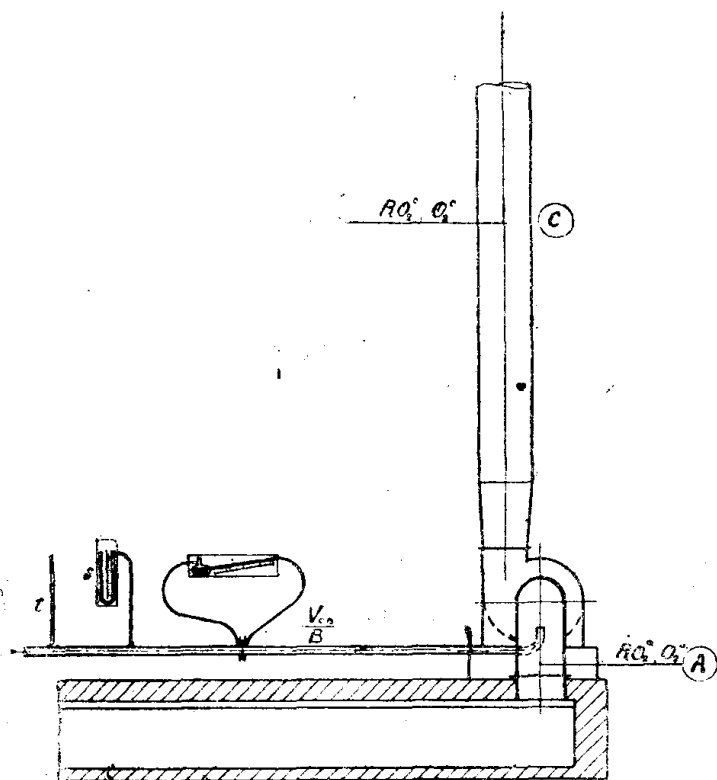


Рис. 1. Схема расположения основных точек замера. К определению объема газов при помощи дополнительного подсоса воздуха.

мм. вод. ст. и барометрическом давлении B мм рт. ст.

Расчетное среднечасовое количество введенного сухого воздуха при нормальных условиях (0,760) определится из выражения

$$V_{св} = V_{вл}^B \frac{273 \left(B - \frac{p_b}{13,6} \right)}{(273 + t_b) 760} - \frac{V_{св} d}{0,805 \cdot 100} \text{ нм}^3/\text{час},$$

откуда

$$V_{св} = V_{вл}^B \frac{289 B - 21,3 p_b}{(273 + t_b) (805 + d)} \text{ нм}^3/\text{час}, \quad (3)$$

где d — среднее содержание влаги в воздухе, определяемое, например, весовым методом в $\text{г}/\text{нм}^3$ сухого воздуха.

По уравнениям (2) и (2') подсчитывается объем сухих газов для сечения А. Для всякого другого сечения газоходов, где производился простой анализ газа, $V_{\text{сг}}^x$ может быть найден из равенства объемов RO_2

$$V_{\text{сг}}^x = V_{\text{сг}}^a \frac{\text{RO}_2^a}{\text{RO}_2^x} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (4)$$

При этом является обязательным, чтоб данный газоход находился вне пределов догорания топочных газов.

С эксплуатационной стороны данный метод вызывает лишь некоторую перегрузку дымососа, что необходимо учитывать в случае полного комплексного испытания установки при учете расхода электроэнергии на собственные нужды.

Точность данного метода будет зависеть главным образом от тщательности работы с газоанализатором. Поэтому необходимо производить анализ газов газоанализатором с микробюреткой, который дает возможность производить отсчеты с точностью до сотых долей объемных процентов. Кроме того, для получения достаточных разностей в показаниях приборов по двум сечениям газоходов количество дополнительно вводимого воздуха должно составлять не менее $3 \div 5\%$ от количества газов. Чем больше количество введенного воздуха, тем точнее будет определение объема газов.

Б. Определение объема газов при помощи дополнительного ввода в газоход водяных паров

Другой путь для определения объема газов может быть намечен следующий. В газоход сразу за последней поверхностью нагрева (котел, водяной или воздушный подогреватель) непрерывно производится дополнительный ввод водяных паров, количество которых замеряется. До места ввода и за ним, где произошло уже достаточное смешение паров с газами, делается простой газовый анализ на RO_2 и O_2 . В этих же сечениях газоходов проводится замер содержания влаги в газах (см. рис. 2). Определяется также содержание влаги в воздухе. Отметим, что дополнительный ввод водяных паров не изменяет процентного состава сухих дымовых газов.

Примем следующие обозначения:

ΔV нм³/кг — присос воздуха на участке А — С;

G_v кг/час — среднечасовое количество дополнительно вводимых водяных паров;

g_a г/нм³ — содержание влаги, приходящейся на 1 нм³ сухого газа в сечении А;

g_c г/нм³ — то же для сечения С;

g'_c г/нм³ — то же для сечения С при условии отсутствия дополнительного ввода водяных паров;

d г/нм³ — среднее содержание влаги в присосанном в газоход воздухе на 1 нм³ сухого воздуха.

Так как в сечении С непосредственным замером определяется лишь величина g_c , а в последующих подсчетах необходимо также знать и величину g'_c , — найдем для нее соответствующее выражение. Для этого составим следующие уравнения при условии отсутствия дополнительного ввода водяных паров и наличии присоса воздуха на участке А — С:

$$g_a V_{\text{сг}}^a + d \Delta V = g'_c (V_{\text{сг}}^a + \Delta V) \text{ г/кг}; \quad (5)$$

$$\frac{\text{RO}_2^a}{100} V_{\text{сг}}^a = \frac{\text{RO}_2^c}{100} (V_{\text{сг}}^a + \Delta V) \text{ нм}^3/\text{кг}; \quad (6)$$

$$\frac{O_2^a}{100} V_{cr}^a + \frac{\Delta V}{100} 21 = \frac{O_2^c}{100} (V_{cr}^a + \Delta V) \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (7)$$

Из уравнений (5) и (6) определим V_{cr}^a и приравняем оба полученные выражения

$$V_{cr}^a = \Delta V \frac{g'_c - d}{g_a - g'_c} = \Delta V \frac{RO_2^c}{RO_2^a - RO_2^c} \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Решив это уравнение относительно g'_c , получим

$$g'_c = \frac{g_a RO_2^c + d (RO_2^a - RO_2^c)}{RO_2^a} \text{ г/нм}^3 \text{ сухого газа.} \quad (8)$$

Аналогично из уравнений (5) и (7) можно получить выражение для g'_c через O_2 :

$$g'_c = \frac{(21 - O_2^c) g_a + d (O_2^c - O_2^a)}{21 - O_2^a} \text{ г/нм}^3 \text{ сухого газа.} \quad (8')$$

Теперь имеются все данные для определения объема сухих газов в сечении С и другом каком-либо газоходе, где процесс горения закончен.

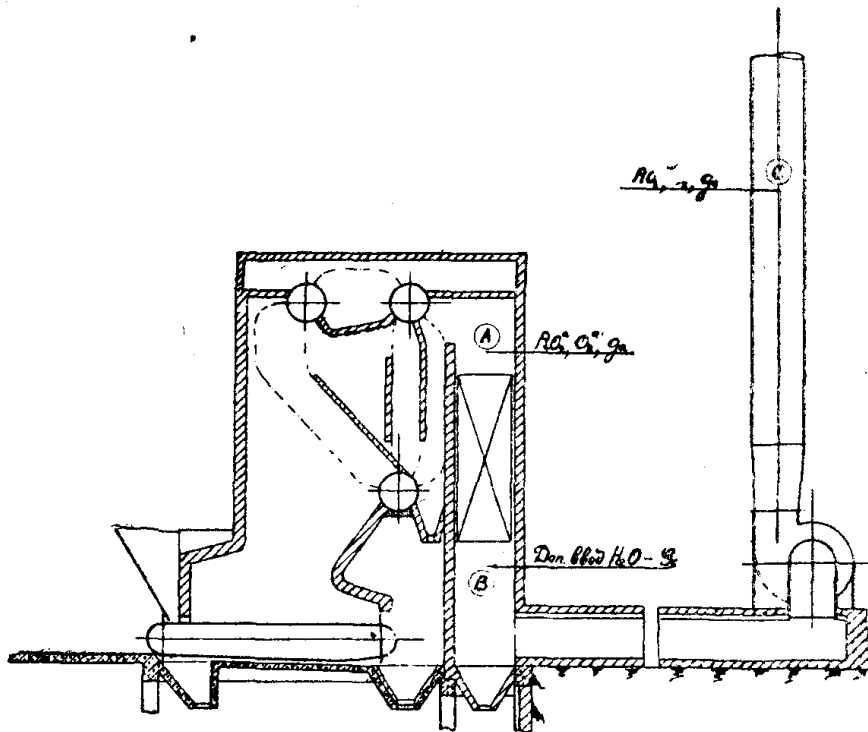


Рис. 2. Схема расположения основных точек замера. К определению объема газов при помощи дополнительного ввода H_2O .

Напишем уравнение баланса влаги

$$g'_c V_{cr}^c + 1000 \frac{G_b}{B} = g_c V_{cr}^c \text{ г/кг.}$$

Для объема сухих газов в сечении С получим выражение:

$$V_{cr}^c = \frac{1000 G_b}{B (g_c - g'_c)} \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (9)$$

Для всякого другого сечения газохода, где процесс горения закончен, объем сухих газов может быть подсчитан по выражению (4).

Добавок водяных паров может быть осуществлен через подвод в газоход воды, полностью испаряющейся за счет теплоты дымовых газов. Аппаратура для подвода, замера и испарения воды может быть выполнена весьма просто. В отношении количества дополнительно вводимых водяных паров нужно заметить следующее. Оно не может быть меньше определенного минимума, зависящего от величины присоса воздуха на участке А—С, а также его влажности. Имея в виду, что для каменных углей (при разных способах его сжигания) объем сухих газов за установкой будет в среднем составлять $\sim 10-12$ нм³/кг и учитывая некоторый запас, можно дать следующее ориентировочное выражение для определения количества водяных паров, подлежащих вводу в газоход:

$$G_v \geq 0,02 B \text{ кг/час.} \quad (10)$$

Для дров, торфа и бурых углей с калорийностью до 4000 ккал/кг, для которых объем сухих газов за установкой составит в среднем $5-6$ нм³/кг,

$$G_v \geq 0,01 B \text{ кг/час.} \quad (10')$$

Естественно, что чем большее количество водяных паров будет дополнительно введено в газоход, тем точнее будет определение объема газов. Замер влажности газов и воздуха предполагается весовым методом, что гарантирует значительную точность определений.

В. Определение объема газов в случае полного сгорания водорода

При полном сгорании водорода топлива в Н₂О, как это обычно и принимается, объем газов может быть определен довольно просто и вместе с тем достаточно точно. В этом случае во время опыта требуется определение содержания влаги в газах. Газовый анализ проводится только упрощенный на RO₂ и O₂. Процентное содержание СО, необходимое для подсчета химической неполноты горения, находится вычислением. Выведем соответствующее выражение для подсчета V_{сг}.

Примем следующие обозначения:

g — содержание влаги в газах в исследуемом газоходе в г/нм³ сухого газа;

RO₂, O₂ и СО — процентное содержание соответствующих газов в том же газоходе;

d — содержание влаги в воздухе в г/нм³ сухого воздуха;

V_д^в — действительное количество сухого воздуха, приходящегося на 1 кг топлива для исследуемого газохода котельной установки, с учетом присоса через обмуровку в нм³/кг;

H, O, S, N... — процентное содержание соответствующих элементов в рабочем топливе.

Полное количество влаги, приходящейся на 1 кг топлива,

$$G = 89,38 H + 10 W + V_d^в d \text{ г/кг.}$$

Для объема сухих газов будем иметь выражение:

$$V_{сг} = \frac{G}{g} = \frac{89,38 H + 10 W + V_d^в d}{g} \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (11)$$

В этом выражении неизвестным является только V_д^в. Для его исключения найдем предварительно связь между V_д^в и V_{сг}. При горении топ-

лива по известным реакциям в атмосфере воздуха, объем последнего будет изменяться. Для учета изменения объема при горении воспользуемся реакциями горения и молекулярными объемами газов.

$$M_{O_2} = 22,394; M_{CO} = 22,398; M_{CO_2} = 22,258 \text{ и } M_{SO_2} = 21,892 \text{ нм}^3/\text{моль}.$$

1. Реакция горения $C + 0,5O_2 = CO$.

В результате химической неполноты горения за счет сгорания части углерода в CO произойдет увеличение объема конечных продуктов горения против V_d^* на величину

$$V^{CO} - V_{O_2}^{CO} = + \frac{CO}{100} V_{cr} - \frac{0,5 \cdot 22,394}{22,398} V_{cr} \frac{CO}{100} \cong + 0,005 V_{cr} CO \text{ нм}^3/\text{кг},$$

где V_{CO} — объем CO, получающийся при сжигании 1 кг топлива,
 $V_{O_2}^{CO}$ — потребное для этого количество кислорода.

2. Реакция горения $H_2 + 0,5 O_2 = H_2O$.

От сгорания „свободного“ водорода $H - O/8$ в H_2O произойдет уменьшение объема на величину кислорода, потребного для горения

$$- \frac{0,5 \cdot 22,394}{2,0156} \frac{H - O/8}{100} = - 0,0555 (H - O/8) \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

3. Считая, что азот топлива перейдет в дымовые газы, получим увеличение объема конечных продуктов горения на

$$+ \frac{N}{100 \gamma_{N_2}} = \frac{N}{125,1} = + 0,008 N \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Вследствие отклонения от закона Авогадро для трехатомных газов при полном горении C и S будем иметь также изменение объема газов.

4. Реакция горения $C + O_2 = CO_2$.

В этом случае имеем уменьшение объема на величину

$$V_{CO_2} - V_{O_2}^{CO_2} = \frac{CO_2}{100} V_{cr} - \frac{22,394}{22,258} V_{cr} \frac{CO_2}{100} = - 0,006 V_{cr} \frac{CO_2}{100} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

5. Реакция горения $S + O_2 = SO_2$.

Уменьшение объема в этом случае составит

$$V_{SO_2} - V_{O_2}^{SO_2} = \frac{SO_2}{100} V_{cr} - \frac{22,394}{21,892} V_{cr} \frac{SO_2}{100} = - 0,0229 V_{cr} \frac{SO_2}{100} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Связь между V_{cr} и V_d^* запишется в следующем виде:

$$V_{cr} = V_d^* + 0,005 V_{cr} CO - 0,0555 (H - O/8) + 0,008 N - 0,00006 V_{cr} CO_2 - 0,000229 V_{cr} SO_2 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Последний член выражения можно расчленить так:

$$0,000229 V_{cr} SO_2 = 0,00006 V_{cr} SO_2 + 0,000169 V_{cr} SO_2.$$

Первое слагаемое объединим с CO_2 и обозначим полученную сумму через RO_2 , а второе выразим через серу S.

Так как в 1 нм³ SO_2 содержится серы

$$\frac{32,06}{64,06} 2,92623 = 1,4645 \text{ кг/нм}^3$$

и

$$V_{SO_2} = \frac{S}{100 \cdot 1,4645} \text{ нм}^3/\text{кг},$$

то

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{cr}} 100 = \frac{S \cdot 100}{100 \cdot 1,4645 V_{cr}} = \frac{S}{1,4645 V_{cr}} \%$$

и

$$0,000169 V_{cr} SO_2 = 0,000169 V_{cr} \frac{S}{1,4645 V_{cr}} = 0,000115 S.$$

Объединяя CO_2 и SO_2 в выражении для V_{cr} и переписывая его для V_d^s , будем иметь:

$$V_d^s = V_{cr} (1 - 0,005 CO + 0,00006 RO_2) + 0,0555 (H - O/8) - 0,008 N + 0,000115 S \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (12)$$

С другой стороны, имеем выражение

$$\begin{aligned} V_d^s &= \frac{\frac{N_2}{100} V_{cr} - \frac{N}{100 \cdot 1,251}}{79} 100 = V_{cr} \frac{N_2}{79} - \frac{0,8 N}{79} = \\ &= V_{cr} \frac{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}{79} - \frac{0,8 N}{79}. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравнявая оба выражения (12) и (13) и производя некоторые преобразования, получим уравнение:

$V_{cr} (21 - 1,005 RO_2 - O_2 - 0,605 CO) = 4,388 (H - O/8) + 0,168 N + 0,009 S$,
откуда находим выражение для CO :

$$\begin{aligned} CO &= 34,71 - 1,66 RO_2 - 1,653 O_2 - \\ &- \frac{7,253 H - 0,91 O + 0,278 N + 0,015 S}{V_{cr}} \%. \end{aligned} \quad (14)$$

Заменяя CO в выражении (12) через (14), имеем:

$$\begin{aligned} V_d^s &= (0,826 + 0,00835 RO_2 + 0,00826 O_2) V_{cr} + 0,092 (H - O/8) - \\ &- 0,0066 N + 0,0002 S \text{ нм}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя полученное выражение для V_d^s (12) уравнение (11) и определяя затем V_{cr} , получим в окончательном виде уравнение для подсчета объема сухих газов:

$$V_{cr} = \frac{89,38 H + 10 W + [0,092 (H - O/8) - 0,0066 N + 0,0002 S] d}{g - (0,826 + 0,00835 RO_2 + 0,00826 O_2) d} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (16)$$

Имея в виду, что величина числителя будет порядка нескольких сотен и что влияние членов с множителями N и S ничтожно, ими можно пренебречь совершенно без ущерба для точности конечных результатов. Можно также округлить коэффициенты при RO_2 и O_2 в знаменателе.

Тогда получим:

$$V_{cr} = \frac{89,38 H + 10 W + 0,092 (H - O/8) d}{g - [0,826 + 0,0083 (RO_2 + O_2)] d} \text{ нм}^3/\text{кг}. \quad (17)$$

Примечание: В выражениях (14) и (16) процентные значения O , S и N должны подставляться, строго говоря, для сгоревшего топлива, которые несколько отличаются от их значений в составе рабо-

чего топлива. Но ввиду незначительного влияния их на конечный результат можно пользоваться при подсчетах составом рабочего топлива. Что касается величины W , то при полном сгорании водорода, как это и предположено в данном случае, нужно ожидать, что вся влага топлива перейдет в газы. Поэтому в формулы следует подставлять W^p . Сказанное в значительной мере будет, очевидно, относиться и к другим упомянутым выше элементам топлива.

Таким образом, при полном сгорании водорода топлива объем сухих газов определяется по данному методу достаточно просто. При этом не требуется анализа газов на CO , процентное содержание которого найдется из уравнения (14). Весь тепловой баланс может быть сведен без каких-либо затруднений.

В случае незначительного недожога водорода, что в большинстве случаев и имеет место, формула (17) для определения $V_{сг}$ может с успехом применяться с подстановкой в нее H^p вместо действительного объема сухих газов.

В котельной лаборатории ТПИ был проведен ряд опытов на горизонтально-водотрубном и локомотивном котлах с слоевым процессом горения. Наряду с общепринятой методикой испытания был применен и разобранный здесь метод. Опыты ставились параллельно с испытаниями, проводившимися кафедрой ТСУ по теплотехническому исследованию различных марок углей. Определение содержания влаги в газах осуществ-

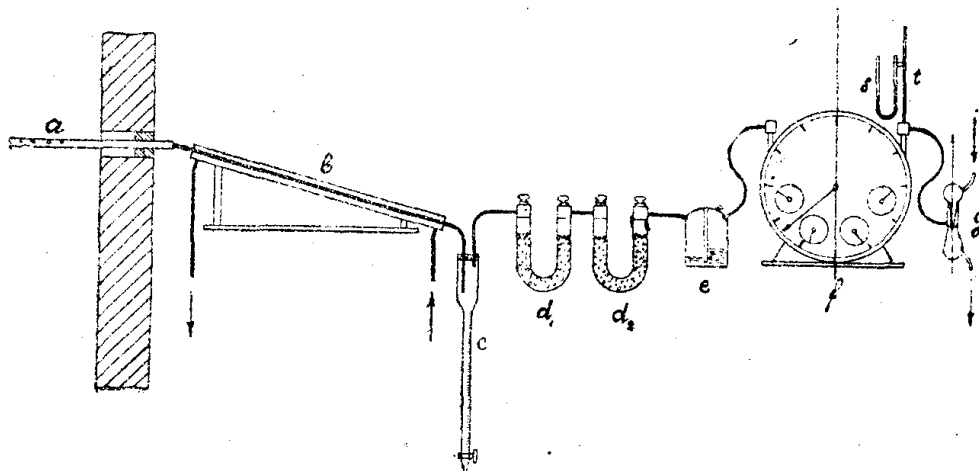


Рис. 3. Схема установки для определения влаги в газах.

а—заборная трубка с фильтром, б—конденсатор, в—сборник конденсата, d_1 —хим. поглотитель влаги с $CaCl_2$, d_2 —контрольный поглотитель влаги, е—затвор с H_2SO_4 , f—газомер, g—эжектор.

влялось с помощью установки, схематично изображенной на рис. 3. Влажность воздуха определялась весовым методом. Особое внимание было обращено на тщательность отбора средней пробы топлива.

Газовыми часами замерялось количество влажного газа v_r м³ при температуре газа в часах t_r и разрежении δ мм. рт. ст. Объем сухого газа, прошедшего через часы, $v_{сг}$, определялся следующим путем.

Если обозначить барометрическое давление воздуха через B мм. рт. ст., парциальное давление водяных паров газа в часах через p_n , парциальное давление сухого газа в смеси через $p_{сг}$, то $v_{сг}$, приведенный к нормальным условиям (0,760) будет равен

$$v_{сг} = v_r \frac{p_{сг}}{760} \frac{273}{273 + t_r} = 0,359 v_r \frac{B - (\delta + p_n)}{273 + t_r} \text{ нм}^3. \quad (18)$$

p_n — находится по соответствующим таблицам при t_r и относительной влажности $\varphi = 100\%$, так как газ, прошедший часы, будет насыщен парами.

То же нужно заметить и в отношении определения влажности воздуха. Так как в перекидном аспираторе, применявшемся для определения влажности воздуха, последний проходил через слой воды, то практически он был полностью насыщен водяными парами. Если $g'_в$ — привес химвсасителел влаги в г, $v_в$ — объем пробы воздуха в м³ при $\varphi = 100\%$, $t_в$ °C и Б мм. рт. ст., $p_n^в$ — парциальное давление водяных паров при $t_в$ °C и $\varphi = 100\%$ в мм. рт. ст., то объем сухого воздуха при 0°С и 760 мм. рт. ст., согласно законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака будет равен

$$V_{св} = v_в \frac{(Б - p_n^в) 273}{760 (273 + t_в)} \text{ нм}^3$$

и содержание влаги, приходящееся на кубометр сухого воздуха, будет определяться по выражению

$$d = \frac{g'_в}{V_{св}} = 2,784 \frac{(273 + t_в) g'_в}{(Б - p_n^в) v_в} \text{ г/нм}^3. \quad (19)$$

Примечание. При проведении испытаний по изложенному здесь методу можно обойтись и без химических поглотителей, улавливающих водяные пары из газа, прошедшего конденсатор. Для этого дополнительно нужно замерять только температуру и разрежение газа по выходе из конденсатора. В этом случае вес водяных паров, оставшихся в газах после конденсатора, найдется из выражения

$$g'_г = \gamma'_п v_r \frac{Б - (\delta + p_n)}{Б - (\delta' + p'_n)} \cdot \frac{273 + t'_г}{273 + t_r} \text{ г}, \quad (20)$$

где $\gamma'_п$ — удельный вес водяных паров при $t'_г$ в г/м³, δ , $t'_г$ и $p'_н$ — разрежение, температура и парциальное давление водяных паров газа при выходе из конденсатора. Остальные обозначения прежние.

Результаты опытов, проводившихся на различных марках углей и в смесях, подтвердили полную возможность и целесообразность проведения испытаний по данному методу, что подтверждалось сравнительными подсчетами тепловых балансов по разным методам.

Общая потеря от механической неполноты горения может быть определена без учета количества шлака, провала и уноса и без технического анализа их. Условное количество сгоревшего углерода, необходимое для подсчета потери Q_4 , определяется по известному выражению

$$K' = 0,539 V_{сг} (RO_2 + CO) \text{ \%}.$$

При дифференцированном определении Q_4 соответствующие наблюдения должны быть поставлены только за шлаком и провалом, что всегда может быть выполнено при соблюдении надлежащей тщательности. Анализ газов может применяться только упрощенный на RO_2 и O_2 . Величина CO , необходимая для определения химической неполноты горения и условного количества сгоревшего углерода, находится простым подсчетом по формуле (14). Потеря в окружающую среду, определяемая как остаточный член баланса, принимает значения более близкие к действительности.

При проведении опыта по данному здесь методу должно соблюдать следующее.

1. Необходимо следить за тщательным отбором средней пробы топлива и определением влажности его.

2. Также является обязательным тщательное определение влажности воздуха.

3. Улавливание водяных паров из газов должно проводиться непрерывно с момента начала до окончания опыта по топливу. Кроме того, для более полного приближения к действительно среднему составу газа, необходимо отсос газа производить одновременно в нескольких точках по сечению газохода, согласовав скорость отсоса с общей скоростью газов в канале.

4. Для более тщательного проведения опыта нужно пропускать через прибор примерно $8 \div 10$ нм³ газа, что для среднего рабочего состава каменных углей даст около 0,5 кг воды в приборе.

5. Из тех же соображений нужно до начала опыта, при установлении режима работы котла пропускать некоторое время газ через прибор (но помимо химвсасывателей), чтобы в начале и конце опыта состояние прибора, на внутренних стенках трубопроводов которого будет находиться роса, было одинаковым.

Г. Учет неполноты горения водорода

Продолжая дальнейшую разработку методики исследования работы котельных установок, можно подойти к вопросу определения количества полностью сгоревшего водорода в H₂O. Обозначим его через H', а остальные элементы топлива, перешедшие в газы—через C', O', N', S', W'.

Возьмем общий случай горения топлива, когда в конечных продуктах горения присутствуют CO, H₂, CH₄, C_m H_n, H₂ S⁰/₁₀ и в очаговых остатках и уносе—C_m, H_m, O_m, N_m и т. д.

Найдем, предварительно, связь между V_{сг} и V_д^в. Поступая аналогично тому, как это делалось в разделе 2-В, здесь необходимо! дополнительно учесть, что объем сухих газов увеличится против действительного объема воздуха, поступившего на горение, еще на величину

$$0,01 (H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) V_{сг} \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Связь между V_{сг} и V_д^в изобразится в этом случае в следующем виде (величиной $0,00017 \cdot H_2 S \cdot V_{сг}$, учитывающей поправку на изменение объема от учета части серы, сгоревшей в H₂S, а не в SO₂,—пренебрегаем):

$$V_{д}^в = V_{сг} [1 - 0,005 CO - 0,01 (H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) + 0,00006 RO_2] + + 0,0555(H' - O'/8) - 0,008 N' + 0,000115 \cdot S'. \quad (21)$$

Выражение (13) в данном случае запишется так:

$$V_{д}^в = V_{сг} \frac{100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S)}{79} - \frac{0,8 N'}{79}. \quad (22)$$

Приравнявая выражения для V_д^в (21) и (22) и опуская некоторые преобразования, получим:

$$CO = 34,71 - 1,66 RO_2 - 1,653 O_2 - 0,347 (H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) - \frac{7,253 (H' - O'/8) + 0,278 N' + 0,015 S'}{V_{сг}} \% \quad (23)$$

и

$$H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S = 100 - 4,786 RO_2 - 4,762 O_2 - 2,881 CO - \frac{20,895 (H' - O'/8) + 0,8 N' + 0,043 S'}{V_{cr}} \% \quad (24)$$

После подстановки выражения (13) в (11), получим следующее выражение для объема сухих газов:

$$V_{cr} = \frac{89,38 H' + 10 W' - 0,01 N' d}{g - 0,01266 N_2 d} \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Так как $N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) \%$, то можно записать, что

$$V_{cr} = \frac{89,38 H' + 10 W' + 0,01 N' d}{g - 1,266 d + 0,01266 (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) d} \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (25)$$

Из выражения (25) можно исключить или CO или $H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S$, пользуясь уравнениями (23) и (24). После этого можно найти выражения для количества полностью сгоревшего водорода.

Из формул (23) и (25)

$$H' = \frac{\{g - [0,826 + 0,00834 \cdot RO_2 + 0,00827 (O_2 - H_2 - CH_4 - C_m H_n - H_2 S)] d\} V_{cr}}{89,38 + 0,092 d} + \frac{-10 W' + (0,0115 O' + 0,0066 N' - 0,0002 S') d}{89,38 + 0,092 d} \% \quad (26)$$

Из (24) и (25)

$$H' = \frac{\{g - [0,0479 RO_2 + 0,0476 (O_2 + 0,5 CO)] d\} V_{cr}}{89,38 + 0,265 d} + \frac{-10 W' + (0,033 O' - 0,0005 S') d}{89,38 + 0,265 d} \% \quad (27)$$

Рассматривая выражение (26), можно отметить, что числитель его будет измеряться числом порядка нескольких сотен ($\sim 300 \div 400$). Слагаемое его $+0,00827 (H_2 + CH_4 + C_m H_n + H_2 S) d V_{cr}$ для котельных установок, где величина, заключенная в скобки, очень мала и даже в худшем случае не превышает $\sim 0,5\%$, составит в целом не более $0,2 \div 0,3$. Если пренебречь этим членом, то ошибка в конечном подсчете для H' составит не более $0,003$, что даже при точных работах не имеет существенного значения. Это взят наихудший случай. Обычно же величина ошибки будет гораздо меньше. Поэтому указанным членом числителя можно спокойно пренебречь без всякого ущерба для точности подсчета.

Другое слагаемое числителя $(0,0115 O' + 0,0066 N' - 0,0002 S') d$ будет также составлять величину порядка $0,2 \div 0,4$ для большинства каменных углей. Для топлив с большим содержанием кислорода оно будет значительно выше. Второй и третий члены рассматриваемого слагаемого, входящие с разными знаками, составят величину не более сотых долей единицы. Пренебрегаем ими, а вместо кислорода сгоревшего топлива подставим O' . Это будет также служить и некоторой компенсацией для отброшенных членов числителя (при наличии химической неполноты горения водорода).

Таким образом, в окончательном виде выражение (26) примет вид:

$$H' = \frac{(g - [0,826 + 0,00834 RO_2 + 0,00827 O_2] d) V_{cr} - 10W_p + 0,0115O_p d}{89,38 + 0,092d} \% \quad (26')$$

Что касается формулы (27), то так как зачастую можно встретить значительный процент CO в дымовых газах, пренебрегать этим членом не следует. Серой сгоревшего топлива можно пренебречь. Конечное выражение для H' в этом случае будет

$$H' = \frac{(g - [0,0479 RO_2 + 0,0476 (O_2 + 0,5 CO)] d) V_{cr} - 10W_p + 0,033O_p d}{89,38 + 0,265d} \% \quad (27')$$

В обеих формулах вместо W' можно подставлять W_p и только лишь в особых, ненормальных случаях слоевого горения топлива, при очень большом количестве провала, следует учитывать неиспаренную влагу топлива, оставшуюся в провале. Тогда при влажности провала W_{np} и часовом количестве его G_{np} в формулы должна подставляться величина

$$W' = W_p - W_{np} \frac{G_{np}}{B} \% \quad (28)$$

Из сравнения обеих формул для определения количества водорода топлива, сгоревшего в H_2O , видно, что при сохранении той же точности формула (26') является наиболее удобной и простой, так как здесь требуется только упрощенный анализ газов на содержание RO_2 и O_2 .

Процентное содержание окиси углерода в этом случае может быть найдено (или проверено) из ур-ния (27'), которое после решения даст следующее выражение для CO:

$$CO = \frac{42}{d} \times \left[g - \frac{(89,38 + 0,265d) H' + 10W_p - 0,033 O_p d}{V_{cr}} \right] - 2,01 RO_2 - 2 O_2 \% \quad (29)$$

Если, при наличии точных газоанализаторов, удастся определить процентное содержание в дымовых газах водорода H_2 , метана CH_4 , этилена C_2H_4 , то можно найти процент механического недожога водорода.

При незначительных округлениях значений удельных весов названных газов это выражение примет следующий вид:

$$H_m = H_p - \{H' + 0,09 V_{cr} [H_2 + 2(CH_4 + C_2H_4)]\} \% \quad (30)$$

С некоторым приближением можно отнести суммарно определенное количество тяжелых углеводородов к этилену. Но в подавляющем большинстве случаев механическая неполнота горения водорода будет, очевидно, определяться проще по выражению

$$H_m = H_p - H' \% \quad (30')$$

ввиду того, что H_2 , CH_4 и C_mH_n будут или равны или близки к нулю.

Заключение

Существующие методы испытания котельных установок и методы сведения тепловых балансов обладают целым рядом существенных недостатков. Поэтому в основном уравнении баланса тепла надежно могут быть определены лишь два члена:

- 1) низшая теплотворная способность рабочего топлива $Q_{нР}$,
- 2) тепло, полезно использованное установкой Q_1 .

Все остальные расходные статьи теплобаланса не дают уверенности в правильном их определении, а подчас даже принимают явно неправдоподобные значения.

Рассмотренные здесь методы дают возможность определить одну из основных величин—объем газов. Методы 2-А и 2-Б требуют особой тщательности по определению состава газов (RO_2 и O_2) и их влажности, так как эти данные входят в знаменатель выражений для $V_{сг}$ в виде разности. Метод 2-В может быть применен в подавляющем большинстве случаев, так как процент несгоревшего водорода обычно мал. Все тепловые потери установки, включая и потерю во внешнюю среду (остаточный член баланса), определяются более точно. При этом для определения механической неполноты горения в целом совершенно не требуется учета ни количества, ни качества шлака, провала и уноса. Это обстоятельство может иметь весьма существенное значение при испытании крупных котельных установок, где подобный учет представляет очень большие затруднения.

В экспериментальной проверке метод 2-В оправдал себя. Особенно он может быть рекомендован для топлив с небольшим выходом летучих, при сжигании которых в нормальных топках химическая неполнота сгорания происходит почти исключительно за счет окиси углерода.

При постановке более тщательных теплотехнических исследований котельной установки в целом, применив в этом случае для определения объема газов один из методов, разобранных в разделе 2, можно весьма просто определить неполноту сгорания водорода по формуле (26'), причем для этого требуется только упрощенный, но тщательно проводимый анализ газа.

Механическая неполнота горения водорода, обычно не учитывавшаяся до сих пор, но представляющая иногда весьма существенную слагающую в общей потере от механического недожога, представляет значительный интерес с двух точек зрения: 1) со стороны правильной оценки работы исследуемой установки и возможности наметки целесообразных мероприятий для устранения недостатков, обнаруженных в работе топочного устройства и 2) с точки зрения изучения поведения водорода, второго по своему значению горючего элемента топлива, сжигаемого в котельной топке. Это обстоятельство позволило бы в дальнейшем внести некоторые коррективы в расчеты, связанные с проектированием новых котельных установок, где механическая неполнота горения водорода совершенно не учитывается.

Предлагаемый метод баланса влаги может быть одинаково распространен и на газообразные топлива.