

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ В НЕФТЯНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПО АНАЛИЗУ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

СОКОЛОВ Ю. Н.

Доцент, кандидат технических наук

Подсчет коэффициента избытка воздуха и неполноты горения топлива на основе сопоставления данных его элементарного состава и объемного анализа продуктов сгорания (при отсутствии непосредственного замера их количества) требует, как известно, подведения материального баланса по каким-либо из элементов, входящих в состав топлива и воздуха. При этом необходимо исходить из априорно устанавливаемых положений о наличии в отходящих газах продуктов неполноты горения отдельных, входящих в состав топлива элементов.

Обычным из таких предположений является учет наличия в продуктах сгорания окиси углерода CO, как результата неполного сгорания углерода топлива. Непосредственного определения объемного содержания CO в продуктах сгорания в этом случае не требуется, так как оно может быть подсчитано по общеизвестной формуле:

$$CO = \frac{21 - \beta CO_2 - (CO_2 + O_2)}{0,605 + \beta},$$

где

$$\beta = \frac{3 \cdot 0,79 \left(h - \frac{o}{8} \right)}{c} \quad \text{— так называемая характеристика топлива, а } h, o \text{ и}$$

c —весовые доли водорода, кислорода и углерода в его элементарном составе¹⁾. Общепринятыми методами здесь легко может быть установлен и коэффициент избытка воздуха, а также и доля неполностью сгоревшего углерода.

В течение ряда лет это предположение считалось общепринятым и для двигателей внутреннего сгорания; впоследствии же, однако, было обращено внимание на то обстоятельство, что при сжигании жидких топлив в цилиндре двигателя неполнота горения выражается в основном не образованием окиси углерода, а выделением свободного углерода в виде сажи или коксообразного нагара. В соответствии с этим, профессором Е. К. Мазинг [1] в 1923 году была опубликована теория, позволяющая установить коэффициент избытка воздуха и неполноту горения углерода топлива, считая, что последняя определяется лишь образованием сажи, причем подсчеты по формулам проф. Мазинг давали значительные отклонения от устанавливаемых на основе предположения о неполноте сгорания в окись углерода результатов. Отсутствие в выхлопных газах CO, принимаемое в теории неполного сгорания при образова-

¹⁾ Здесь и ниже весовые доли элементарного состава топлива в отличие от объемного состава продуктов сгорания мы будем обозначать малыми буквами.

нии сажи, подтверждалось тем обстоятельством, что улавливать окись углерода в продуктах сгорания двигателя обычными методами (прибор Орса) в большинстве случаев не удастся. Это обстоятельство позволило неполноту сгорания при образовании сажи считать общепринятой в теории двигателей внутреннего сгорания до последнего времени.

Десять лет спустя к этим же выводам приходит доктор-инж. Аккерман [2], которым дается „треугольник сгорания“, позволяющий определять неполноту горения за счет образования сажи графически.

Уже самими авторами теории неполного сгорания за счет образования сажи признавалась возможность наличия в выхлопных газах двигателя (наряду с сажой и нагаром) окиси углерода и других продуктов неполного окисления горючих составных частей топлива.

В литературе имеется и ряд более определенных указаний о наличии в выхлопных газах двигателей продуктов неполного окисления. Так, инж Венцель [3] в своих опытах по сжиганию моторных топлив в бомбе, в обстановке близкой к истинным условиям сгорания их в цилиндре двигателя, в случаях $\alpha \ll 1,2$ обнаруживал заметные количества СО в продуктах сгорания. Есть указания также и на наличие в выхлопных газах двигателей водорода (H_2), тяжелых и легких углеводородов.

В книге проф. Мазинг „Тепловой процесс двигателей внутр. сгорания“ (1937) имеются уже конкретные примеры подсчета неполноты сгорания при одновременном образовании и сажи и окиси углерода (правда, лишь для газового двигателя), а также приводится формула, позволяющая установить коэффициент избытка воздуха с учетом образования сажи и наличия окиси углерода и выведенная доцентом С. Е. Лебедевым. Последним проведены и дальнейшие работы в области применения анализа выхлопных газов при испытаниях двигателей.

Краткий обзор, здесь приведенный, показывает, что наличие в выхлопных газах двигателя не только сажи, но и окиси углерода и других продуктов неполного окисления в настоящее время следует считать общепризнанным. Практическая необходимость учета этого обстоятельства при определении коэффициента избытка воздуха и подсчете неполноты горения (при очевидности выделения основной массы несгоревшего углерода в виде сажи или нагара) остается однако необоснованной, а сам метод такого учета недостаточно разработан.

В связи с этим автором была поставлена задача установить общие соотношения, позволяющие (на основе сопоставления данных объемного анализа выхлопных газов нефтяного двигателя и элементарного состава сжигаемого в нем топлива) определить коэффициент избытка воздуха и потерю тепла от неполноты горения, считая, что последняя определяется не только образованием сажи, но и неполным окислением углерода, а также—возможной неполнотой сгорания имеющейся в топливе серы; проанализировать возможность упрощения этих соотношений за счет некоторых допущений и установить пригодные для практического пользования рабочие формулы и, наконец, проверить их применимость экспериментально. Решению этой задачи и посвящается настоящая работа.

Мы не считали, однако, необходимым вводить учет возможного наличия в выхлопных газах водорода, так как значительная скорость реакции его окисления позволяет считать, что его содержание будет еще меньшим, чем для СО, а определение H_2 при техническом анализе продуктов сгорания связано с затруднениями; это наряду со значительным усложнением расчетных формул сделало бы такой учет практически мало применимым. Что же касается углеводородов, то в ряде проведенных автором опытов с нефтяным двигателем точными химическими исследованиями удавалось обнаружить их лишь в виде едва заметных следов, что наряду с

соображениями, указанными по отношению к водороду, делало нецелесообразным учет и этих продуктов неполного сгорания. Мы полагаем, что одновременный учет в продуктах сгорания элементарного углерода и его окиси (CO) уже само по себе представляет известный шаг вперед по сравнению с применявшимися до последнего времени методами. Этому вопросу нами, естественно, и было уделено наибольшее внимание.

Вывод общих соотношений

Рассмотрим сначала наиболее общий случай, считая, что неполнота горения углерода выражается как в образовании сажи, так (частично) и в образовании окиси углерода CO, а имеющаяся в топливе сера также сгорает лишь частично.

Весовой состав топлива

$$c + s + h + o + n = 1 \text{ кг}$$

естественно, должен быть известен; будем считать, что из всего углерода (с) топлива некоторая доля

$x_1 c$ —сгорает, образуя окись углерода CO, а

$x_2 c$ —остается в виде аморфного углерода, образуя сажу. При этом

$x = x_1 + x_2$ будет выражать общую долю неполностью сгоревшего углерода, а

$(1-x)c$ —ту часть углерода топлива, которая сгорает полностью, образуя CO₂.

Точно так же полагаем, что находящаяся в топливе сера в количестве ys —не сгорает, отлагаясь в виде элементарной серы,

а $(1-y)s$ —сгорает полностью, образуя SO₂.

При этих условиях в продуктах сгорания одного килограмма топлива будем иметь:

$$\text{CO}_2 — \frac{1}{12} (1-x) c \text{ молей}$$

$$\text{CO} — \frac{1}{12} x_1 c \quad "$$

$$\text{C} — \frac{1}{12} x_2 c \quad "$$

$$\text{SO}_2 — \frac{1}{32} (1-y) s \quad "$$

$$\text{S} — \frac{1}{32} y s \quad "$$

$$\text{H}_2\text{O} — \frac{1}{2} h \quad "$$

$$\text{N}_2 — \frac{1}{28} n + 0,79 \alpha L_0 \quad "$$

$$\text{O}_2 — 0,21 \alpha L_0 + \frac{o}{32} —$$

$$- \left[\frac{1}{12} (1-x) c + \frac{1}{24} x_1 c + \frac{1}{32} (1-y) s + \frac{1}{4} h \right] \text{ молей,}$$

где

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left[\frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{n}{4} - \frac{o}{32} \right] = \frac{c}{0,21 \cdot 12} \cdot \sigma \text{ моль/кг} \quad (1)$$

— теоретическое количество воздуха, подсчитываемое по условиям полного сгорания,

$$\alpha = \frac{\text{фактическое количество воздуха}}{\text{теоретич. колич. воздуха по полному сгоранию}}$$

— коэффициент избытка воздуха по полному сгоранию, а

$$\sigma = 1 + \frac{3}{c} \left(h + \frac{s-o}{8} \right) \quad (2)$$

— так называемая немецкая характеристика топлива.

Количество сухих газов, получаемых при сгорании одного кг топлива должно быть

$$M_{\text{сг}} = \frac{1}{28} n + \frac{100}{21} \cdot \frac{1}{12} c \alpha + \frac{o}{32} + \frac{1}{24} x_1 c - \frac{1}{4} h = \frac{1}{12} A \frac{\text{молей}}{\text{кг}}, \quad (3)$$

где для упрощения введена условная величина

$$A = 0,429n + 0,375 \cdot o + 4,76c\alpha + 0,5x_1c - 3h. \quad (4)$$

Если теперь выразить относительные объемные доли углекислоты, окиси углерода, сернистого ангидрида, кислорода и азота в сухих продуктах сгорания в процентах и обозначить их соответственно CO_2 , CO , SO_2 , O_2 и N_2 , легко получить следующие пять уравнений:

$$\frac{A}{100} \text{CO}_2 = (1-x)c \quad (5)$$

$$\frac{A}{100} \text{CO} = x_1 \cdot c \quad (6)$$

$$\frac{A}{100} \text{SO}_2 = 0,375(1-y)s \quad (7)$$

$$\frac{A}{100} \text{O}_2 = c\alpha + 0,375 \cdot o - (1-x + 0,5x_1)c - 0,375(1-y)s - 3h. \quad (8)$$

$$\frac{A}{100} \text{N}_2 = 0,429n + 3,76c\alpha. \quad (9)$$

При наличии данных объемного анализа продуктов сгорания и элементарного состава топлива неизвестными в этих уравнениях будут α и величины, определяющие неполноту горения отдельных составных частей топлива x_1 , x и y .

В уравнениях (6) и (9) имеем лишь два неизвестных x_1 и α ¹⁾. Решая их как систему, получим:

$$\alpha = \frac{(100 - 0,5 \text{CO} - \text{N}_2) 0,429n + \text{N}_2 (3h - 0,375 \cdot o)}{[4,76 \text{N}_2 - 3,76(100 - 0,5 \text{CO})] c\alpha} \quad (10)$$

и

$$x_1 = \frac{\text{CO}}{c} \cdot \frac{0,429n + 0,375 \cdot o + 4,76c\alpha - 3h}{100 - 0,5 \text{CO}} \quad (11)$$

¹⁾ Не следует упускать из вида, что величина A включает неизвестные α и x_1 .

Из уравнения (5) легко определяется и общая неполнота горения

$$x = 1 - \frac{A}{100} \cdot \frac{CO_2}{c}, \quad (12)$$

а неполнота горения за счет образования сажи будет

$$x_2 = x - x_1. \quad (13)$$

Наконец, неполнота горения серы (y) может быть проще всего определена из уравнения (7) по содержанию SO_2 в выхлопных газах

$$y = 1 - \frac{1}{0,375} \cdot \frac{A}{100} \cdot \frac{SO_2}{s}. \quad (14)$$

По относительным характеристикам неполноты горения x_1 , x_2 и y легко могут быть подсчитаны и потери тепла на $кГ$ израсходованного топлива:

$$\text{от неполноты горения угле-} \begin{cases} \text{рода} & \text{в } CO & q_{co} = 5700 x_1 c \text{ кал/кГ} & (15) \\ & \text{в сажу} & q_c = 8140 x_2 c & (16) \end{cases}$$

$$\text{От неполноты горения серы} \quad q_s = 2452 y s \quad (17)$$

$$\text{и общая потеря} \quad q = q_{co} + q_c + q_s \text{ кал/кГ} \quad (18)$$

Величины c и s , а также x_1 , x_2 и y здесь должны быть взяты в долях единицы, а не в процентах.

Полученные выражения (10)–(18) и позволяют установить коэффициент избытка воздуха, относительные характеристики неполноты горения и потери тепла ей соответствующие, если известен химический состав топлива и проведен полный анализ выхлопных газов с определением $RO_2 = CO_2 + SO_2$, O_2 , CO и SO_2 . Выражения эти, однако, сложны и неудобны для практического их применения. Кроме того, проведение полного анализа выхлопных газов также весьма затруднительно и не всегда осуществимо в практической обстановке.

Естественно, возникает стремление упростить выделенные соотношения и сократить число определяемых газовым анализом величин, вводя некоторые, упрощающие конечные результаты, допущения. Такие упрощения, однако, должны быть подвергнуты анализу с точки зрения выяснения допустимости получаемой за их счет ошибки.

Возможные допущения и упрощения

Проанализируем прежде всего возможность неучета неполноты горения серы, т. е. допущения $y = 0$, что, очевидно, вполне возможно благодаря незначительному содержанию серы в обычных сортах жидких топлив.

Складывая уравнения (5) и (7) при $y = 0$, получим

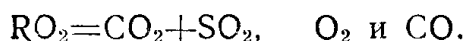
$$\frac{A}{100} (CO_2 + SO_2) = \frac{A}{100} RO_2 = (1 - x) c + 0,375 \cdot s,$$

откуда

$$x = 1 - 0,375 \frac{s}{c} - \frac{A}{100} \cdot \frac{RO_2}{c}, \quad (19)$$

причем α и x_1 , необходимые для вычисления величины A по уравнению (4), определяются, как и ранее, по выражениям (10) и (11).

Таким образом, для полного определения неполноты горения в этом случае необходимо установить анализом выхлопных газов лишь процентное содержание в них



Для выяснения возможной величины ошибки, получаемой от пренебрежения неполнотой сгорания серы, принимаем топливо с максимально возможным содержанием серы:

$$\begin{array}{ll} c = 85,4\% & n = 0,4\% \\ h = 12,2\% & o = 0,0\% \\ s = 2,0\% & 100,0\% \end{array}$$

и полагаем, что оно сгорает при умеренном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,5$ и при максимальных значениях неполноты горения углерода:

$$\begin{array}{ll} \text{в сажу} & x_2 = 0,30, \\ \text{в } CO & x_1 = 0,05 \\ \text{и серы—} & y = 0,5. \end{array}$$

Подсчитывая по полным формулам соответствующее этим условиям объемное содержание составных частей продуктов сгорания и, принимая их за результат анализа выхлопных газов, устанавливаем в предположении $y = 0$

$$\alpha = 1,50, \quad x_1 = 0,05, \quad x' = 0,345, \quad x'_2 = 0,295.$$

Ошибки от допущения $y = 0$ таким образом составляют:

$$\Delta_{\alpha}^{y=0} = 0; \quad \Delta_{x_1}^{y=0} = 0; \quad \Delta_x^{y=0} = \frac{x' - x}{x} 100 = -1,43\%$$

и

$$\Delta_{x_2}^{y=0} = \frac{x'_2 - x_2}{x_2} 100 = -1,67\%.$$

Потеря тепла от неполноты горения, соответствующая принятым значениям x_1 , x_2 и y , должна быть $q = 2353 \text{ кал/кг}$, а, подсчитанная в предположении $y = 0$, она будет лишь $q' = 2293 \text{ кал/кг}$. Ошибка в потере тепла от допущения $y = 0$ будет, следовательно,

$$\Delta_q^{y=0} = \frac{q' - q}{q} 100 = -2,55\%.$$

Получаемые значения ошибок—на грани допустимых (при обычной точности измерений и вычислений). Следует, однако, иметь в виду, что рассмотренный пример предусматривает максимально возможное (едва ли могущее встретиться в практике) содержание серы и доходящую до 50% неполноту ее горения.

С целью выяснения конкретных значений могущей иметь место неполноты горения, нами был проведен ряд опытов на компрессорном двигателе Дизеля (серия „СО“)¹), охватывающих весьма широкий диапазон различных (с точки зрения возможной степени неполноты горения) условий его работы. Неполнота горения по каждому из этих опытов была подсчитана по полным формулам и при наличии различных упрощений.

¹) Описание этих опытов и их общих результатов см. ниже.

Таблица I

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОДСЧЕТА НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ
ПО РАЗНЫМ ФОРМУЛАМ И СЧИТАЯ $Y=0$ ДЛЯ ОПЫТОВ СЕРИИ CO^*

Величина		ОБО- ЗНАЧ- ЕНИЕ	РАЗМЕР- НОСТЬ	РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕН ПО ОПЫТАМ					
				CO-40	CO-45	CO-50	CO-58	CO-min	CO-max
С УЧЕТОМ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ СЕРЫ-ПОСРЕД CO ₂ и SO ₂ В ОТН. ГАЗАХ.	КОЭФ. ИЗБЫТКА ВОЗДУХА	α	—	1,310	1,590	1,663	1,854	2,635	1,665
		В СО	X_1 %	3,3	1,6	2,1	1,8	0,0	4,9
		В САЗУ	X_2 %	24,5	17,3	13,2	9,2	19,3	12,6
	ОТНОСИТЕЛЬН. НЕПОЛНОТА ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА	ВСЕГО	X %	27,8	18,9	15,3	11,0	19,3	17,5
		СЕРЫ	Y %	52,9	52,1	29,6	(-35?)	(-156)	9,3
		В СО	q_{CO} ККАЛ/КГ	164	82	102	90	—	242
	ПОТЕРЯ ТЕПЛА ОТ НЕПОЛНОТЫ ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА	В САЗУ	q_c %	1735	1225	934	651	1367	892
		СЕРЫ	q_s %	3	3	2	—	—	1
		ВСЕГО	q %	1902	1310	1038	741	1367	1135
	ОТНОСИТ. НЕПОЛНОТА ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА	В СО	X'_1 %	3,30	1,65	2,06	1,82	0,00	4,89
		В САЗУ	X'_2 %	24,50	17,20	13,19	9,04	19,10	12,55
		ВСЕГО	X' %	27,80	18,85	15,25	10,86	19,10	17,44
СЧИТАЯ $Y=0$ — ПО СУММАРН. СОДЕРЖ. RO ₂ = CO ₂ + SO ₂	ОТНОСИТ. НЕПОЛНОТА ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА	В СО	q'_{CO} ККАЛ/КГ	164	82	102	90	—	242
		В САЗУ	q'_c %	1735	1218	934	641	1353	889
		ВСЕГО	q' %	1899	1300	1036	731	1353	1131
	ОШИБКА В ПОТЕРЕ ТЕПЛА ПРИ ДОПУЩЕН $Y=0$		$\Delta = \frac{q - q'}{q}$ %	-0,16	-0,76	-0,19	-1,35	-1,02	-0,35

Таблица II

Величина ошибок от допущения $CO=0$ по опытам серии CO^*

Величина		ОБО- ЗНАЧ- ЕНИЕ	РАЗМЕР- НОСТЬ	РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПО ОПЫТАМ					
				CO-40	CO-45	CO-50	CO-58	CO-min	CO-max
КОЭФ. ИЗБЫТКА ВОЗДУХА	СЧИТАЯ $Y=0$	α'	—	1,310	1,590	1,663	1,854	2,635	1,665
	СЧИТАЯ $Y=0$ и $X_1=0$	α''	—	1,240	1,546	1,607	1,798	2,635	1,537
	ОШИБКА	$\Delta \alpha^{CO=0}$ %	%	-5,3	-2,8	-3,4	-3,0	0,0	-7,7
ОТНОСИТЕЛЬН. НЕПОЛНОТА ГОР. В САЗУ ОБЩАЯ	СЧИТАЯ $Y=0$	X' %	%	27,80	18,85	15,25	10,86	19,10	17,44
	СЧИТАЯ $Y=0$ и $X_1=0$	X'' %	%	32,11	21,35	18,45	13,89	19,10	24,33
	ОШИБКА	$\Delta X^{CO=0}$ %	%	+15,5	+13,3	+21,0	+27,9	0,0	+89,5
	СЧИТАЯ $Y=0$	X'_2 %	%	24,50	17,20	13,19	9,04	19,10	12,55
	СЧИТАЯ $Y=0$ и $X_1=0$	X''_2 %	%	32,11	21,35	18,45	13,89	19,10	24,33
	ОШИБКА	$\Delta X_2^{CO=0}$ %	%	31,1	24,1	39,9	53,7	0,0	93,8
ПОТЕРЯ ТЕПЛА ОТ НЕПОЛН. ГОРЕНИЯ	СЧИТАЯ $Y=0$	q' ККАЛ/КГ	ККАЛ/КГ	1899	1300	1036	731	1353	1131
	СЧИТАЯ $Y=0$ и $X_1=0$	q'' %	%	2274	1512	1307	984	1353	1723
	ОШИБКА	$\Delta q^{CO=0}$ %	%	+19,8	+16,2	+26,2	+34,6	0,0	+52,3
СОДЕРЖАНИЕ СО В ВЫХ. ГАЗАХ		CO	%	0,39	0,16	0,19	0,15	следы	0,45

В таблице I приведены результаты таких подсчетов для каждого из упомянутых опытов. Как явствует из рассмотрения этой таблицы, неполнота горения углерода за счет образования сажи доходит почти до 25%, а за счет образования CO—до 5%.

Что касается неполноты горения серы, то в некоторых опытах для нее были получены отрицательные (?) значения. Это может быть объяснено, очевидно, лишь наличием неточностей в определении SO₂ в выхлопных газах, вполне возможных за счет поглощения SO₂ водой, конденсирующейся в заборных трубках, и выделения его вновь при повышающейся (в момент пропускания через них анализируемой порции газа) температуре. Во всяком случае, получаемые при опытах значения SO₂ следует считать скорее преувеличенными, нежели заниженными. При этом максимальная неполнота горения серы (опыт CO—40) была установлена как 52,9%, однако получаемая от пренебрежения ею ошибка в потере тепла, при применении топлива с нормальным содержанием серы (0,25%), составляет в том же опыте лишь 0,16%. Максимальная величина этой ошибки (опыт CO—48) при явно завышенном ($y < 0$) определении SO₂ не превосходит 1,35%.

Рассмотрение материала, основанного на непосредственном эксперименте, приводит, таким образом, к заключению, что могущие получаться за счет пренебрежения неполнотой горения серы ошибки в потере тепла вполне допустимы и, следовательно, упрощение это можно смело применять в практической обстановке, тем более, что ошибки в значениях x_1 , x_2 и x почти вовсе неощутимы.

Целесообразность такого допущения диктуется стремлением не столько упростить расчетные формулы, сколько избавиться от необходимости определения содержания SO₂ в выхлопных газах, что в практической обстановке оказывается весьма существенным, так как определение это является одним из наиболее сложных и наименее надежных.

Совсем иначе обстоит дело при проведении анализа возможности неучета содержания в выхлопных газах окиси углерода CO. Ошибка, могущая возникнуть за счет этого неучета, может достигнуть уже весьма значительной величины.

Тем не менее, предположение об отсутствии CO в выхлопных газах настолько упрощает проведение их анализа (остается лишь определить $RO_2 = CO_2 + SO_2$ и O₂, а азот может быть вычислен по разности $N_2 = 100 - (RO_2 + O_2)$) и обработку результатов опыта, что проанализировать влияние этой ошибки и установить насколько возможно ее допущение оказывается совершенно необходимым.

В предположении CO = 0, если пренебречь и неполнотой сгорания серы, мы возвращаемся к теории неполного сгорания при образовании сажи, данной проф. Мазинг, а впоследствии доктором Аккерман. Исходя, однако, и в данном случае из установленных выше соотношений, будем иметь:

$$\alpha = \frac{(100 - N_2) 0,429 n + N_2 (3h - 0,375 \cdot o)}{[4,76 N_2 - 376] c s}; \quad (20)$$

$$A = 0,429 n + 0,375 \cdot o + 4,76 c s s - 3h, \quad (21)$$

$$x = x_2 = 1 - \frac{A}{100} \frac{CO_2}{c}. \quad (12)$$

Так как прибор Орса дает, как это обычно принимают, не CO₂, а $RO_2 = CO_2 + SO_2$, удобнее воспользоваться выражением

$$x = x_2 = 1 - 0,375 \frac{s}{c} - \frac{A}{100} \cdot \frac{RO_2}{c}, \quad (19)$$

тем более, что член $0,375 \frac{s}{c}$ зависит лишь от состава топлива и может быть вычислен заранее для целой серии опытов.

Для проверки практической возможности рассматриваемого допущения ($CO=0$; $x_1=0$) определим величину ошибки, могущую иметь место для случаев:

$$\begin{array}{llll} \text{I) } x = 0,35 & x_1 = 0,05 & x_2 = 0,30 & \alpha = 1,5 \\ \text{и II) } x = 0,10 & x_1 = 0,005 & x_2 = 0,095 & \alpha = 2,0, \end{array}$$

причем первый из них соответствует максимальным значениям характеристик неполноты горения, а второй—наиболее часто встречаемым.

Принимая тот же, что и в предыдущем примере (при выяснении ошибки от допущения $y=0$), состав топлива, аналогичным приемом (вычисляя по полным формулам соответствующий принятым значениям неполноты горения состав выхлопных газов и определяя по нему при допущении $CO=0$ характеристики неполноты горения заново), устанавливаем следующие величины возможных от пренебрежения образованием CO ошибок.

Величина		α	x	x_1	x_2	q кал/кг
Принятые значения	сл. I	1,500	0,350	0,050	0,300	2355
	сл. II	2,000	0,100	0,005	0,095	710
Значения по подсчету при $x_1=0$	сл. I	1,470	0,366	0,000	0,366	2545
	сл. II	1,979	0,110	0,000	0,110	765
Ошибка в %	сл. I	-2,00	+4,67	-100,00	+22,0	+8,07
	сл. II	-1,05	+10,00	-100,00	+15,8	+7,74

Как видим, значения коэффициента избытка воздуха α от неучета наличия CO в выхлопных газах получаются преуменьшенными, а характеристики неполноты горения—преувеличенными. Относительная величина ошибки, получаемой от этого допущения, при вычислении α сравнительно невелика. При вычислении неполноты горения ошибка эта, однако, далеко превосходит обычно допускаемые пределы, достигая по величине x_2 —22% и даже по потере тепла от неполноты горения—8%¹⁾, причем оба рассматриваемые случаи являются вполне возможными.

Обращаясь к непосредственно получаемому из опыта материалу той же серии испытаний, о которой было указано при рассмотрении влияния неучета неполноты горения серы, устанавливаем величины ошибок от пренебрежения наличием в выхлопных газах CO , приводимые в таблице II. Эти ошибки еще больше, чем были получены в рассмотренных выше примерах, а в некоторых случаях они даже более 50%. Характерно, что относительная величина ошибки становится весьма ощутимой не только при больших содержаниях CO в выхлопных газах, но даже и при малых, если общая неполнота горения при этом невелика (опыт CO —58).

Рассмотренный материал с совершенной очевидностью показывает, что пренебрегать наличием CO в выхлопных газах двигателя (то-есть считать, что вся неполнота горения обусловливается лишь образованием сажи) не следует, так как при этом легко полу-

¹⁾ 100-процентная ошибка в величине x_1 , как допущенная сознательно, разумеется, не рассматривается.

чить чрезвычайно большую ошибку в конечных результатах оценки неполноты горения.

В установленных выше общих соотношениях предполагалось наличие полных данных об элементарном составе топлива, причем содержание в нем кислорода и азота должно было быть известно поотдельности. В большинстве случаев, при проведении анализа жидкого топлива ограничиваются лишь непосредственным определением в нем углерода, водорода и серы, остаток же, составляющий обычно лишь доли процента, принимают за сумму кислорода и азота без последующего их разделения. Естественно, возникает стремление при определении неполноты горения избавиться от необходимости иметь отдельные значения o и n , вводя в то же время некоторые упрощения и в структуру самих формул, установленных выше.

Так как содержание азота и кислорода в обычных сортах жидких топлив весьма невелико, разница в конечных результатах подсчета интересующих нас величин будет, очевидно, невелика, если всю сумму $o + n$ мы примем только за o или только за n .

Рассматриваемое в предыдущих примерах топливо при $n = 0,4\%$ и $o = 0,0\%$ следует считать предельным по содержанию азота. Посмотрим, какова будет разница в определяемых величинах при составе продуктов сгорания $RO_2 = 6,68\%$, $O_2 = 10,59\%$, $CO = 0,51\%$ и $N_2 = 82,22\%$, соответствующем максимальным значениям x_1 и x_2 для двух крайних случаев состава топлива по кислороду и азоту:

$$I) c = 85,4\% \quad h = 12,2\% \quad s = 2,0\% \quad o = 0,4\% \quad n = 0,0\%$$

$$II) c = 85,4\% \quad h = 12,2\% \quad s = 2,0\% \quad o = 0,0\% \quad n = 0,4\%$$

Проводя соответствующие подсчеты по формулам, справедливым при $y = 0$, но $CO \neq 0$, получаем следующие результаты:

	I случай $n = 0,0$ $o = 0,4$	II случай $n = 0,4$ $o = 0,0$	Разница $\frac{I-II}{I} \cdot 100\%$
1) Немецкая характеристика топлива σ	1,436	1,437	0,07%
2) Коэффициент избытка воздуха α	1,497	1,503	0,40%
3) Величина A	835	842	0,83%
4) Относительная неполнота горения в CO x_1	0,0496	0,0500	0,80%
5) Относительная неполнота горения в сажу x_2	0,296	0,300	1,33%

Получаемые расхождения даже для этих крайних случаев, очевидно, вполне допустимы.

Заметим далее, что в выражениях

$$A = 0,429 n + 0,375 \cdot o + 4,76 c \alpha + 0,5 x_1 c - 3h$$

$$\text{и } A - 0,5 x_1 c = 0,429 n + 0,375 \cdot o + 4,76 c \alpha - 3h$$

величина $0,429 n$ при значении $n = 0,15$ в опытах серии CO составляет лишь около $0,009\%$ от всей величины A или $A - 0,5 x_1 c$ даже для случаев с минимальными значениями этих величин. Того же порядка будет, очевидно, и ошибка, если даже принять $0,429 \cdot n \cong 0$.

Кроме того, в формуле для определения α

$$\alpha = \frac{(100 - 0,5 CO - N_2) 0,429 n + N_2 (3h - 0,375 \cdot o)}{[4,76 N_2 - 3,76 (100 - 0,5 CO)] c \sigma}$$

первый член числителя в наихудшем для опытов серии СО случае (СО — min) составляет лишь $\frac{1,229}{2958} \cdot 100 = 0,04\%$ от всего числителя.

Все отмеченное позволяет прийти к заключению, что во всех практически возможных случаях вполне допустимо:

а) сумму $o + n$ в элементарном составе топлива принимать за o , т. е. полагать $n = 0$;

б) упростить и самые формулы, отбросив 1-й член числителя в выражении для α , а в выражениях для A и $A - 0,5x_1c$, члены, содержащие o и n , объединить общим коэффициентом

$$\frac{0,429 + 0,375}{2} \cong 0,4,$$

не опасаясь при этом получения сколь-либо заметных ошибок в конечных результатах.

Приведенный анализ возможных допущений таким образом устанавливает, что полученные выше основные соотношения возможно упростить:

1) за счет пренебрежения неполнотой горения серы;

2) за счет пренебрежения азотом в топливе или объединения членов, содержащих o и n , общим коэффициентом.

В то же время упрощение расчетных формул за счет пренебрежения наличием СО в выхлопных газах ни в коем случае недопустимо.

Расчетные формулы, их применение

Реализуя допускаемые на основе проведенного анализа упрощения, основные формулы для определения коэффициента избытка воздуха и характеристик неполноты горения приводим к виду:

$$\alpha = \frac{N_2(3h - 0,375 o)}{[4,76 \cdot N_2 - 3,76(100 - 0,5CO)]cs}; \quad (22)$$

$$x_1 = \frac{CO}{c} \frac{4,76cs\alpha - [3h - 0,4(o + n)]}{100 - 0,5CO}; \quad (23)$$

$$A = 4,76cs\alpha - [3h - 0,4(o + n)] + 0,5x_1c, \quad (24)$$

причем попрежнему:

$$x = 1 + 0,375 \frac{s}{c} - \frac{A}{100} \frac{RO_2}{c}, \quad (19)$$

$$x_2 = x - x_1, \quad (13)$$

и

$$\sigma = 1 + \frac{3}{c} \left(h + \frac{s - o}{8} \right). \quad (2)$$

Эти формулы и можно считать расчетными, однако внешний их вид довольно сложен.

Можно было бы попытаться путем введения еще некоторых допущений исключить в выражении для α (22) составные части топлива, выражая все лишь через характеристику топлива σ или $\delta = 1 - \sigma$. Мы считаем, однако, это нецелесообразным и полагаем, что удобство практического

пользования расчетными формулами будет обеспечено в большей мере, если помимо σ ввести еще некоторые коэффициенты:

$$a = \frac{3h - 0,375 \cdot o}{c\sigma}; \quad (25)$$

$$b = 4,76c\sigma; \quad (26)$$

$$d = 3h - 0,4(o + n) \quad (27)$$

и

$$e = 1 + 0,375 \frac{s}{c}, \quad (28)$$

зависящие лишь от состава топлива и, следовательно, могущие быть вычисленными заранее для целой серии опытов, проводимых на топливе одного и того же состава.

Расчетные формулы примут теперь вид:

$$\alpha = \frac{a \cdot N_2}{4,76N_2 - 3,76(100 - 0,5CO)} = f(N_2, CO); \quad (29)$$

$$x_1 = \frac{CO}{c} \cdot \frac{bz - d}{100 - 0,5CO} = \varphi(\alpha, CO); \quad (30)$$

$$A = bz - d + 0,5x_1c = \psi(\alpha, x_1); \quad (31)$$

$$x = e - \frac{A}{100} \frac{RO_2}{c} = \Phi(A, RO_2), \quad (32)$$

причем вычисления по ним при установленных заранее цифровых значениях коэффициентов a, b, d и e не представляют уже существенных затруднений.

По данным анализа выхлопных газов должно быть известно объемное содержание в них RO_2, O_2 и CO (N_2 вычисляется по остатку). Два первых определения проводятся с помощью обыкновенного прибора Орса, а для определения объемного содержания CO должен быть применен какой-либо более чувствительный метод, так как здесь дело приходится иметь с десятymi и сотыми долями процента.

При массовой обработке результатов целого ряда опытов, проведенных на данном топливе, целесообразно номографировать установленные выше соотношения. Такая номограмма приведена на рис. 1. Она дает возможность по известным значениям N_2, CO и RO_2 установить последовательными отсчетами интересующие нас величины α, x_1, A и x , после чего неполнота горения в сажу x_2 вычисляется по разности $x - x_1$, а величина A может быть использована при определении объема сухих газов, так как число молей их, приходящееся на 1 кг израсходованного

топлива, согласно указанному выше, будет $M_{сг} = \frac{A}{12} \frac{\text{молей}}{\text{кг}}$, если зна-

чения c, h, o и n при вычислении подставлять в долях единицы или $M_{сг} = \frac{1}{12} \cdot \frac{A}{100} \frac{\text{молей}}{\text{кг}}$, если эти величины, как это обычно принято, выражать в процентах.

Построение номограммы проводится по выражениям (29), (30) и (32), а пользование ею становится понятным при рассмотрении нанесенных на ней пунктирных прямых, соответствующих двум случаям, из которых в первом содержание CO было 0,45%, а во втором окись углерода отсутствовала.

Номограмма

для определения неполноты горения по анализу выхлопных газов

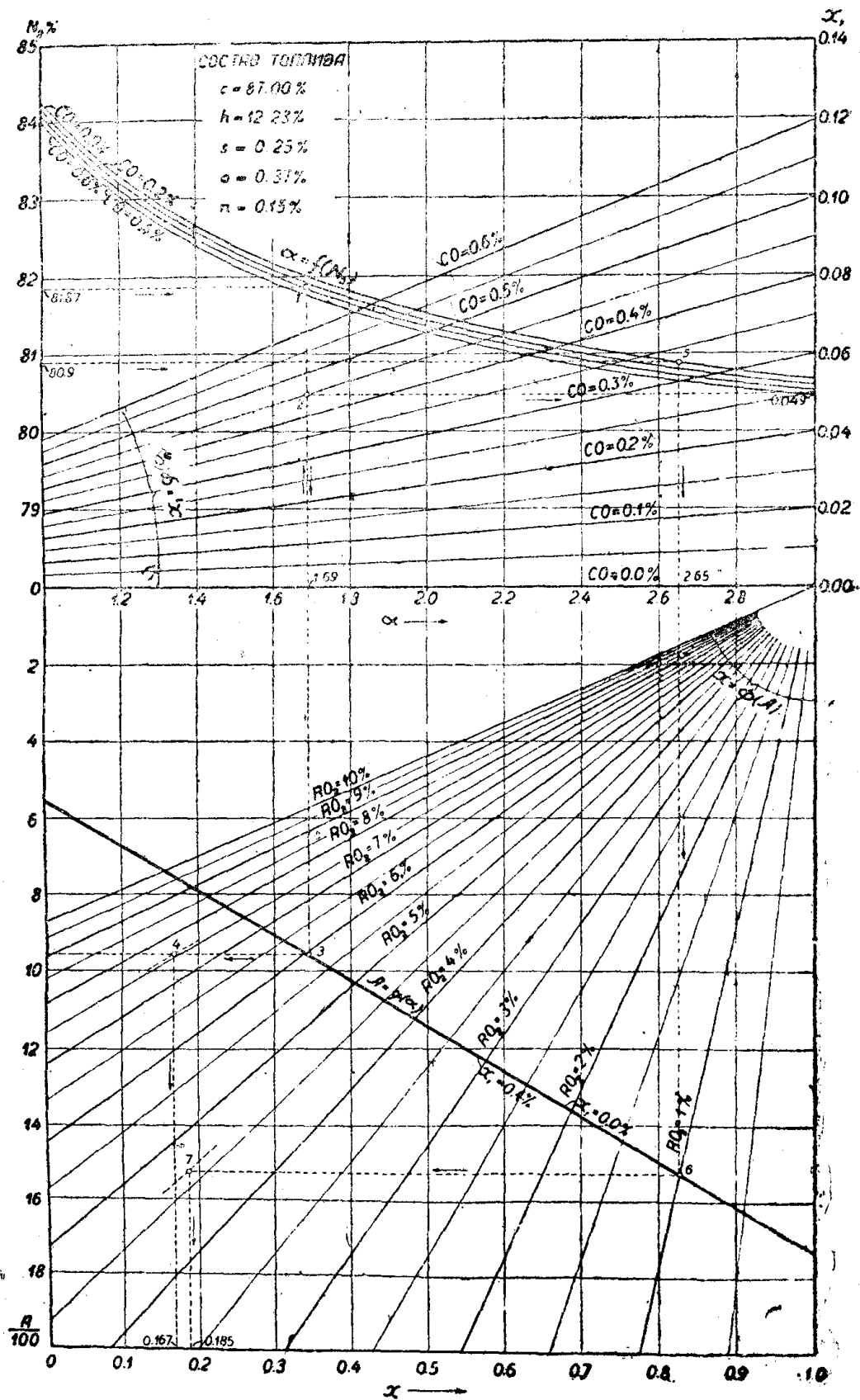


Рис. 1

Экспериментальная проверка установленных соотношений

С целью проверки результатов применения установленных выше соотношений в практических условиях испытания нефтяных двигателей, а также установления возможных значений объемного содержания неопределяемых обычно составных частей продуктов сгорания (CO , SO_2), использованных в рассмотренных выше примерах, автором был поставлен ряд опытов на небольшом (15 л. с.) компрессорном двигателе Дизеля в лаборатории двигателей внутреннего сгорания Томского политехнического института.

Серия испытаний (в ряде других опытов автора она шифруется CO) состояла из ряда опытов при одинаковой (около 75%) нагрузке двигателя с изменением давления распыливающего воздуха, что обычно наиболее радикально изменяет условия сгорания (и степень неполноты горения). Удавшимися из этих опытов были признаны лишь четыре.

Кроме того, были проведены два опыта (min и max), соответствующие условиям, обеспечивающим наибольшую (большой коэффициент избытка воздуха) и наименьшую (малый) возможность образования в продуктах сгорания окиси углерода.

Все опыты проводились умышленно при недостаточно хорошо отрегулированной форсуночной системе двигателя.

Топливом во всех опытах служило одно и то же моторное топливо, состава по весу:

$$\begin{array}{ll} c = 87,00\%, & n = 0,15\% \\ h = 12,23\%, & o = 0,37\% \\ s = 0,25\%, & \hline & 100,00\% \end{array}$$

анализ которого был проведен особенно тщательно.

Особое внимание было уделено также анализу выхлопных газов. Содержание в них углекислоты (CO_2) и кислорода (O_2) определялось обычным прибором Орса, с соблюдением, однако, особых предосторожностей, при тщательном наблюдении за поглотительной способностью реактивов и при проведении значительного числа взаимоконтролирующих анализов по каждому опыту.

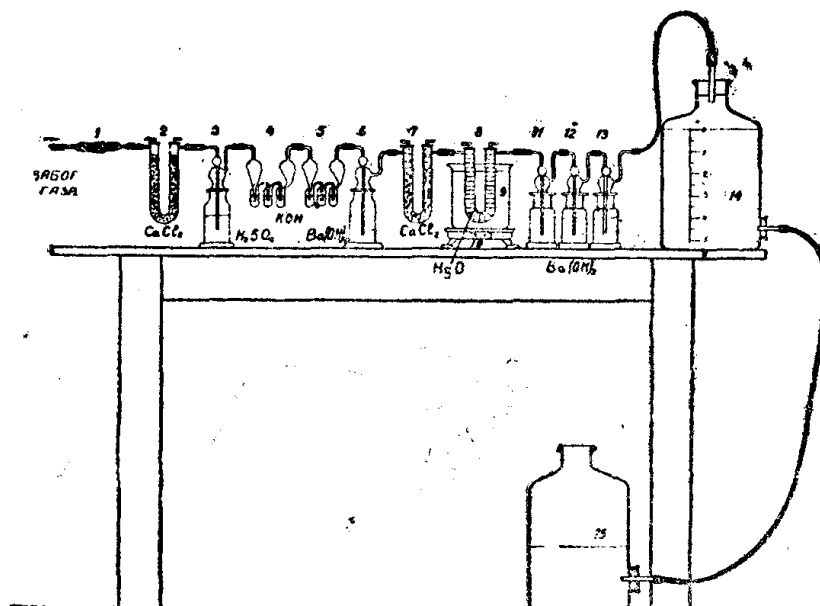
Чтобы обеспечить возможность учета весьма малых количеств CO и SO_2 в выхлопных газах и проверить (хотя бы качественно) вероятность наличия в них тяжелых углеводородов, была применена аппаратура, изображенная на рис. 2. Сущность метода состояла здесь в просасывании аспираторами определенной порции газов из выхлопного трубопровода через всю систему приборов по рис. 2, причем SO_2 улавливалось в фильтре 1 ватой, смоченной перекисью водорода, а после поглощения всей углекислоты в ряде кали-аппаратов (4—5). В U-образной трубке с окисью ртути, служащей для этой цели хорошим катализатором, остающаяся в газах окись углерода CO доокислялась в CO_2 (за счет свободного кислорода в самих газах), по результатам поглощения которой (CO_2) в последующих склянках Дрекселя с баритовой водой (11—13) и устанавливалось количество имеющейся в газах окиси углерода.

Результаты анализа газов по рассматриваемым опытам представлены в таблице III (строки 20—25), а на рис. 3 эти данные представлены графически в зависимости от коэффициента избытка воздуха α . Расположение точек в непосредственной близости кривых RO_2 и O_2 , являющихся почти прямыми, свидетельствует об удовлетворительной точности этих определений. Содержание CO довольно интенсивно возрастает при уменьшении избытка воздуха, что вполне очевидно. В одном из опытов (CO max) точка однако поднялась значительно выше, что может быть объяс-

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ СЕРИИ "СО"

НАИМЕНОВАНИЕ		ОБО- ЗНА- ЧЕНИЕ	РАЗМЕР ПОКА- ТЕЛЯ	Н О М Е Р А О П Ы Т О В					
№ п/п				1	2	3	4	5	6
1	Цифра опыта	—	—	СО-40	СО-45	СО-50	СО-58	СО-мин	СО-макс
2	Дата проведения опыта	—	—	13.VI.38	13.VI.38	10.VI.38	10.VI.38	13.VI.38	13.VI.38
3	Продолжительность опыта	—	мин.	24	70	40	40	20	40
4	Барометрическое давление	Н	мм.рт.ст.	751	751	732	732	751	751
5	Температура окружающей среды	°С	°С	18,0	18,0	18,5	18,5	18,0	18,0
6	Сорт топлива	Нефтяное моторное топливо							
7	Рабочий температурный диапазон	Q ₁	ккал/кг	9865					
8	Удельный вес при 20°С	γ ₂₀	кг/л	0,900					
9	Часовой расход топлива	B	кг/сек	5,070	3,520	3,220	3,080	2,295	3,325
10	Удельный (на час) расход	B ₁	г/л.св.	427	332	284	269	407	232
11	Число оборотов в минуту	n	об/мин	229,8	233,0	233,0	233,0	226,8	231,3
12	Эффективная мощность	N _e	л.с.	11,88	11,60	11,33	11,47	7,37	14,34
13	Эффективный коэффициент	η _e	%	51,8	54,9	55,4	57,8	42,7	62,3
14	Индикаторная мощность	N _i	л.с.	16,35	17,57	17,74	18,50	13,30	19,77
15	Индикаторный коэффициент	η _i	%	40,0	46,9	50,0	58,2	64,8	64,9
16	Средний давл. в цилиндре	p _{ср}	атм.	15,0	21,1	22,0	23,9	20,6	27,6
17	Эффективный КПД	η _е	%	72,7	66,0	63,9	62,0	55,4	72,6
18	Индикаторный КПД	η _и	%	20,6	32,0	35,4	38,6	37,2	38,0
19	Средняя температура отходящих газов	t _{ср}	°С	302,5	310,3	291,8	270,8	199,8	292,3
20	Углекислота	CO ₂	%	8,534	7,845	7,813	7,337	4,634	7,591
21	Сернистый ангидрид	SO ₂	"	0,006	0,005	0,007	0,013	0,016	0,009
22	CO ₂ +SO ₂ (по прибору Орса)	RO ₂	"	8,54	7,85	7,82	7,35	4,65	7,60
23	Окись углерода	CO	"	0,39	0,16	0,19	0,15	0,22	0,45
24	Кислорода	O ₂	"	8,30	9,85	10,01	10,83	14,45	10,08
25	Азот (по остатку)	N ₂	"	82,77	82,14	81,98	81,67	80,90	81,87
26	По формуле Автора (по прибору)	α	—	1,310	1,590	1,663	1,854	2,635	1,665
27	" " " " " " " "	α ₁	—	1,244	1,551	1,612	1,805	2,648	1,542
28	" " " " " " " "	α ₂	—	1,245	1,554	1,605	1,812	2,775	1,580
29	Число молекул смеси газов	ΣM _г	моль/кг	0,613	0,750	0,787	0,880	1,283	0,788
30	" " " " " " " "	M _г	"	0,071	0,073	0,073	0,075	0,081	0,073
31	" " " " " " " "	M _г	"	0,084	0,823	0,860	0,955	1,364	0,861
32	Молярная теплотворность смеси газов (по прибору)	Q _г	ккал/моль	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544
33	Молярная теплотворность водородных газов (по прибору)	Q _г	ккал/моль	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544
34	Молярная теплотворность водородных газов (по прибору)	Q _г	ккал/моль	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544	6,544
35	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
36	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
37	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
38	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
39	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
40	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
41	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
42	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
43	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
44	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
45	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
46	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
47	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
48	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
49	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
50	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
51	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
52	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
53	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
54	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634
55	Полная теплотворность продуктов сгорания топлива	Q _с	ккал/кг	4,476	5,386	5,628	6,250	8,926	5,634

нено резко отличающимися (в сторону ухудшения условий сгорания) условиями этого опыта при наличии значительно большей нагрузки. В полученных значениях SO_2 закономерности не установлено. Кроме того,



Аппаратура, применяемая для определения CO и SO_2 в выхлопных газах.

Рис. 2

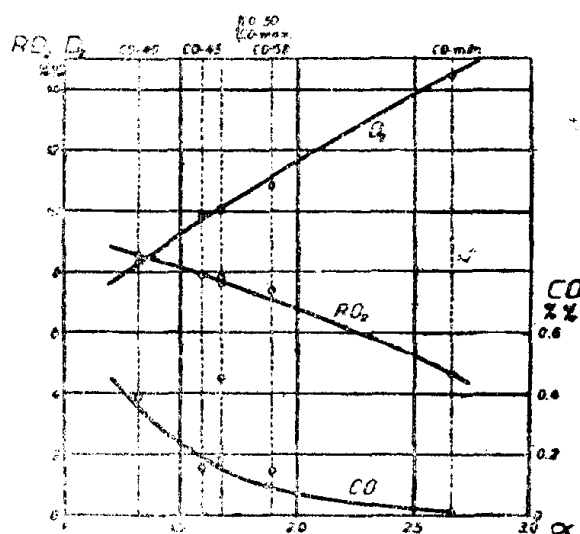
в некоторых опытах (как уже указывалось выше) были получены содержания SO_2 больше возможных.

Вообще следует признать, что получить надежное определение SO_2 за счет возможного его растворения водой, конденсирующей в заборных трубках, не удастся; применявшийся же метод определения CO оказался достаточно чувствительным и надежным.

Результаты обработки материалов рассматриваемых опытов сведены в таблице III. Помимо установления характеристик горения по формулам автора (29—32), те же величины были подсчитаны и на основе теории неполного сгорания за счет образования сажи по формулам проф. Мазинг и д-ра Аккерман.

Сопоставление результатов этих подсчетов с очевидностью подтверждает установленные выше положения, что теория неполного сгорания за счет образования только сажи дает несколько заниженные значения коэффициента избытка воздуха и весьма преувеличенную оценку неполноты горения, ошибка в которой за счет неучета наличия CO в выхлопных газах доходит в отдельных случаях почти до 50%.

Для сопоставления наиболее интересные данные результатов обработки материала опытов, проведенных при одинаковой нагрузке, но с



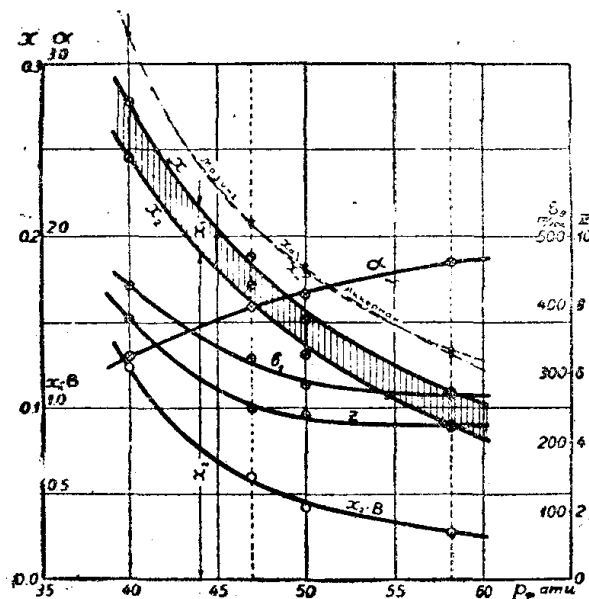
Состав выхл. газов по опытам серии "CO" в зависимости от α

Рис. 3

переменным форсуночным давлением, представлены в виде кривых на рис. 4. Здесь весьма характерно интенсивное возрастание общей относительной неполноты горения x и относительной неполноты горения в сажу x_2 при почти постоянных значениях относительной неполноты горения в CO — x_1 . Кривые, соответствующие значениям относительной неполноты горения (только в сажу) по формулам Мазинга и Аккермана почти совпадают, но проходят значительно выше кривой x .

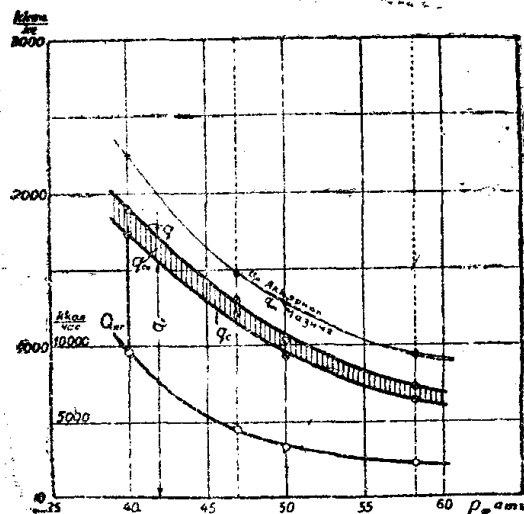
На том же графике (рис. 4) представлена для сравнения и кривая изменения условного показателя неполноты горения z по отложениям сажи, определяемого в соответствии с разработанным автором методом [4].

На рис. 5 графически представлена зависимость потери тепла за счет неполноты горения (общей на килограмм топлива — q , за счет образова-



Основные результаты опытов серии „CO“

Рис. 4



Потери тепла неполноты горения по опытам серии „CO“

Рис. 5

ния сажи — q_c и за счет образования CO — q_{co}), а также и часового расхода тепла от неполноты горения Q кал/час от форсуночного давления p_f . Для сравнения нанесены соответствующие кривые, получаемые в результате подсчета потери тепла по формулам Мазинга и Аккермана. Характер зависимостей здесь остается почти тем же, что и для относительных характеристик неполноты горения (рис. 3).

Рассмотрение полученных экспериментальных материалов, их обработка и анализ результатов позволяют констатировать, что применимость установленных выше соотношений к определению неполноты горения и потерь тепла, ею обусловливаемых (на основе анализа выхлопных газов двигателя и сопоставления его с данными об элементарном составе топлива), а также доказанная выше недопустимость пренебрежения наличием окиси углерода в выхлопных газах двигателя подтверждаются практикой работы двигателя Дизеля на тяжелом жидком топливе.

Заключение

На основе проведенных в настоящей работе теоретических исследований, подтверждающих их числовых примеров, базирующихся на данных практики и, наконец, по результатам проверки применения установленных

заключений и методов к охватываемому достаточно широкий диапазон работы двигателя Дизеля конкретному случаю, могут быть сделаны следующие основные выводы.

1. Определение всех основных видов неполноты горения по сопоставлению данных анализа выхлопных газов с элементарным составом топлива является вполне возможным, для чего, однако, необходимо, помимо обычных определений CO_2 [RO_2] и O_2 в выхлопных газах двигателя, устанавливать еще (количественно) содержание в них CO и SO_2 .

2. Учет возможной неполноты горения серы не является необходимым, так как получаемая от допущения ее полного сгорания (в оценке общей потери от неполноты горения обычных жидких топлив) ошибка мало ощутима и не выходит за пределы обычной точности наблюдений и вычислений. Вследствие этого необходимость определения SO_2 в выхлопных газах отпадает.

3. Пренебрежение наличием окиси углерода в выхлопных газах двигателя при желании сколь-либо точно (количественно) определить неполноту горения является недопустимым, так как получаемые по соотношениям, установленным на основе этого допущения, результаты дают в большинстве случаев весьма заметное преувеличение в оценке неполноты горения и потери тепла, ей соответствующей.

4. Необходимое для правильной оценки неполноты горения количественное определение окиси углерода в выхлопных газах двигателя в тех малых количествах, как это здесь имеет место, может быть выполнено в практической обстановке применением метода доокисления CO в CO_2 в присутствии катализатора, каковым является окись ртути при 100°C , с достаточной для данной цели точностью.

5. Раздельное установление содержания кислорода и азота в жидком топливе для данных целей не является необходимым, так как, полученная при замене максимально возможных количеств азота кислородом, ошибка мало ощутима. В связи с этим установленные для определения основных потерь от неполноты горения формулы заметно упрощаются, причем они легко могут быть номографированы.

Этими выводами и разрешаются поставленные автором задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Мазинг. Применение анализа отработанных газов к исследованию двигателей жидкого топлива с определением неполноты горения по саже. Бюллетень НАГИ 1923.
2. Dr. Ing. Ackerman. Das Verberennungs-dreieck bei Russbildung. V.D.I. Forschungsheft — 366. Mai — Juni 1934. Реф. „Дизелестроение“ № 3 за 1936 г.
3. Др.-инж. В. Венцель. Процессы воспламенения и сгорания в бескомпрессорных дизелях. Forschungsheft 336, 1934. Перевод в томе III монографии „Двигатели внутр. сгорания“.
4. Доц. Ю. Н. Соколов. Определение неполноты горения в нефтяных двигателях по отложениям сажи. „Дизелестроение“ №№ 7 и 8. 1939.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K},$	$/273 + 25 = 293 \text{ K},$