

Методика Равича

В последние годы широкое распространение при теплотехнических испытаниях котлов получила методика, разработанная проф. М. Б. Равичем. При расчетах по этой методике не требуется выполнять трудоемкие работы по определению состава и теплоты сгорания топлива, облегчается обработка результатов испытаний. Несмотря на некоторые допущения, принятые в методике, результаты, полученные при пользовании ею, вполне удовлетворяют практическим целям режимно-наладочных испытаний. Методика основана на использовании некоторых обобщенных характеристик топлива, подвергающихся незначительным колебаниям при изменении его состава и теплоты сгорания. Ниже приводятся значения этих характеристик (констант) и поправочных коэффициентов:

t_{\max} — жаропроизводительность или максимальная температура ($^{\circ}\text{C}$), которая может быть получена при полном сгорании газа в теоретически необходимом объеме сухого воздуха при температуре 0°C и отсутствии потерь тепла

$$t_{\max} = \frac{Q_H}{\sum V_{C(0-t_{\max})}},$$

где V — объем компонентов продуктов горения, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$C(0-t_{\max})$ — средневзвешенная объемная теплоемкость продуктов горения при постоянном давлении в интервале температур от 0°C до t_{\max} , $\text{ккал}/\text{м}^3$;

p — количество тепла, выделяемое при полном сгорании топлива в теоретически необходимом объеме воздуха, отнесенное к 1 м^3 сухих продуктов горения ($\alpha = 1$), $\text{ккал}/\text{м}^3$;

$$p = Q_H/V_{\text{сг}}$$

B — соотношение объемов сухих продуктов горения и суммарного объема продуктов горения.

$$B = \frac{V_{CO_2'} + V_{N_2'}}{V_{CO_2'} + V_{N_2'} + V_{H_2O}};$$

C' — отношение средней теплоемкости не разбавленных воздухом продуктов горения в интервале от 0°C до $t_{\text{п.г}}$, к их теплоемкости в интервале от 0°C до t_{\max}

$$C' = \frac{C_{0-t_{\text{п.г}}}}{C_{0-t_{\max}}};$$

K — отношение средней объемной теплоемкости воздуха при температуре от 0°C до $t_{\text{п.г}}$ к объемной теплоемкости разбавленных воздухом продуктов горения в интервале от 0°C до t_{\max}

$$K = \frac{C_{0-t_{\text{п.г}}}^{\text{в}}}{C_{0-t_{\max}}};$$

h – изменение объема сухих продуктов горения по сравнению с теоретическим вследствие разбавления их воздухом, а также неполноты горения

$$h = \frac{CO_{2\max}}{CO_2' + CO' + CH_4'};$$

Значения p , B и другие теплотехнические характеристики газов приведены в табл. 7, а для смесей природного и коксового газов, природного и попутного газов – табл. 8. Поправочные коэффициенты C' и K приведены в табл. 9.

Величина коэффициента разбавления сухих продуктов горения определяется по данным анализа уходящих газов. При значительном недожоге h может оказаться меньше 1. Коэффициенты h и α связаны следующей зависимостью, определяемой содержанием избыточного воздуха в сухих продуктах горения:

$$V_{изб} = (\alpha - 1) V_0 = (h - 1) V_{с.г.}$$

Если учесть, что соотношение $V_{с.г.}$ к V_0 при полном сгорании природного газа равно $\sim 0,9$ (для попутных и сжиженных газов 0,92), то формула может быть представлена в следующем виде:

$$\alpha = 1 + (h - 1) * 0,9.$$

Таблица 7. Теплотехническая характеристика некоторых природных и попутных газов

Газ и местонахождение	Q_n , Ккал/м ³	V_o , м ³ /м ³	$V_{с.г.}$, м ³ /м ³	$V_{п.г.}$, м ³ /м ³	t'_{\max} , °С	$CO_{2\max}$ %	p	B
	1	2	3	4	5	6	7	8
Природный газ								
Березанское (Краснодарский край)	8930	9.9	8.8	11.0	2010	12.4	1000	0.81
Березовское (Тюменская обл.)	8310	9.2	8.3	10.3	2010	11.8	1000	0.81
Бугурусланское	8770	9.7	8.8	10.8	2000	12.0	990	0.81
Вой-Войжское, Нибельское (р. Коми)	8180	9.1	8.3	10.1	2000	11.8	990	0.81
Дашавское	8520	9.5	8.5	10.5	2100	11.8	1000	0.81
Деминское (Тюменская обл.)	8150	9.1	8.2	10.1	2010	11.7	1000	0.81
Джебольское (р. Коми)	9200	10.2	9.2	11.4	2005	12.1	1000	0.81
Елшанское (Саратовская обл.)	8440	9.4	8.4	10.4	2000	11.8	1000	0.81
Краснооктябрьское (Куйбышевская обл.)	8060	8.9	8.2	10.0	2010	11.8	990	0.82
Кызылкумское	9410	10.4	9.4	11.5	2015	12.0	1000	0.82
Усть-Вилуйское (Якутия)	9050	10.1	9.1	11.1	2010	12.0	1000	0.81
Шебелинское	9130	10.1	9.1	11.2	2010	12.0	1000	0.81
Попутный газ								
Мухановское (куагурский горизонт)	13240	14.6	18.3	16.0	2050	13.2	990	0.83
Ромашкинское	14220	15.6	14.3	17.1	2050	18.2	1000	0.83
Туймазинское (девонские отложения)	14200	15.6	14.2	17.1	2050	13.2	1000	0.83

Таблица 8. Расчетные характеристики смеси некоторых горючих газов

Газ	Отношение объема газа к 1 объему природного	$t_{\max, \text{ }^{\circ}\text{C}}$	$P, \text{ ккал/м}^3$	B	$\text{CO}_2 \text{ max, \%}$
Природный и коксовый	0,5	2020	1010	0,80	11,6
	1	2030	1020	0,80	11,4
	2	2050	1040	0,79	11,2
	4	2070	1060	0,78	10,9
Природный и попутный	0,4	2020	1000	0,81	12,2
	0,8	2030	1000	0,81	12,5
	2	2040	990	0,83	12,9

Таблица 9. Значения поправочных коэффициентов C' и K

Температура продуктов горения, $^{\circ}\text{C}$	C'	K	C'	K
	При малом содержании N_2 и CO_2		При большом содержании N_2 и CO_2	
100	0,82	0,78	0,83	0,79
200	0,83	0,78	0,84	0,79
300	0,84	0,79	0,86	0,80
400	0,86	0,80	0,87	0,81
500	0,87	0,81	0,88	0,82
600	0,88	0,82	0,90	0,83

Состав продуктов полного сгорания природного газа значения h и α приведены в табл. 10, а попутного газа – табл. 11.

Потери тепла (%) с уходящими газами при отсутствии подогрева воздуха и с учетом температуры и влажности воздуха определяется по формулам:

При $h > 1$

$$q_2 = \frac{t_{yx} - t_b}{t'_{\max}} [C' + (h-1)BK] \cdot 100, \quad (*)$$

при $h < 1$

$$q_2 = \frac{t_{yx} - t_b}{t'_{\max}} hC' \cdot 100,$$

где t'_{\max} – жаропроизводительность с учетом содержания в воздухе примерно 1% влаги (по массе), $^{\circ}\text{C}$. В расчетах принимают, что t'_{\max} меньше на 30°C t_{\max} . (см. табл.8)

Если в формулу (*) подставить значение t'_{\max} для определенного вида топлива, значения C' и K для определенных температурных интервалов, а величину h – принять в зависимости от содержания в продуктах горения CO_2 , CO и CH_4 , то эта формула примет вид

$$q_2 = 0,01_z(t_{yx} - t_b).$$

Значения z для природного газа приведены в таблице 12.

Таблица 12. Значения величины z для природного газа

Сумма $\text{CO}'_2 + \text{CO}'$ $+ \text{CH}'_4$	Температура продуктов горения, °C			Сумма $\text{CO}'_2 + \text{CO}'$ $+ \text{CH}'_4$	Температура продуктов горения, °C		
	До 250	250-350	350-500		До 250	250-350	350-500
11,8	4,13	4,16	4,28	9,8	4,75	4,83	4,9
11,7	4,15	4,21	4,31	9,7	4,80	4,87	4,9
11,6	4,18	4,25	4,33	9,6	4,84	4,90	5,0
11,5	4,21	4,28	4,37	9,5	4,88	4,95	5,0
11,4	4,24	4,30	4,40	9,4	4,93	5,0	5,1
11,3	4,26	4,32	4,43	9,3	4,97	5,05	5,15
11,2	4,28	4,34	4,46	9,2	5,02	5,07	5,20
11,1	4,30	4,37	4,48	9,1	5,07	5,10	5,2
11,0	4,35	4,40	4,50	9,0	5,10	5,15	5,3
10,9	4,40	4,43	4,53	8,9	5,13	5,22	5,3
10,8	4,43	4,47	4,57	8,8	5,17	5,26	5,3
10,7	4,45	4,50	4,60	8,7	5,22	5,30	5,4
10,6	4,48	4,53	4,65	8,6	5,27	5,35	5,4
10,5	4,50	4,56	4,67	8,5	5,30	5,40	5,50
10,4	4,53	4,60	4,70	8,4	5,35	5,45	5,6
10,3	4,57	4,63	4,75	8,3	5,40	5,50	5,6
10,2	4,60	4,65	4,78	8,2	5,45	5,55	5,6
10,1	4,63	4,70	4,80	8,1	5,50	5,60	5,7
10,0	4,67	4,75	4,85	8,0	5,57	5,67	5,7

Таблица 10. Состав продуктов полного сгорания природных газов

CO_2'	O_2'	N_2'	h	α	CO_2'	O_2'	N_2'	h	α
11,8	0,0	88,2	1,00	1,00	7,8	7,1	85,1	1,51	1,46
11,6	0,4	88,0	1,02	1,02	7,6	7,5	84,9	1,55	1,50
11,4	0,7	87,9	1,03	1,03	7,4	7,8	84,8	1,59	1,53
11,2	1,1	87,7	1,05	1,05	7,2	8,2	84,6	1,64	1,57
11,0	1,4	87,6	1,07	1,06	7,0	8,5	84,5	1,68	1,61
10,8	1,8	87,4	1,09	1,08	6,8	8,9	84,3	1,73	1,66
10,6	2,1	87,3	1,11	1,10	6,6	9,2'	84,2	1,79	1,71
10,4	2,5	87,1	1,13	1,12	6,4	9,6	84,0	1,85	1,76
10,2	2,8	87,0	1,15	1,14	6,2	10,0	83,8	1,90	1,82
10,0	3,2	86,8	1,18	1,16	6,0	10,3	83,7	1,96	1,87
9,8	3,6	86,6	1,20	1,18	5,8	10,7	83,5	2,03	1,94
9,6	3,9	86,5	1,23	1,20	5,6	11,0	83,4	2,11	2,00
9,4	4,2	86,4	1,25	1,22	5,4	11,4	83,2	2,18	2,07
9,2	4,6	86,2	1,28	1,25	5,2	11,8	83,0	2,26	2,15
9,0	5,0	86,0	1,31	1,28	5,0	12,1	82,9	2,36	2,22
8,8	5,3	85,9	1,34	1,30	4,8	12,5	82,7	2,46	2,31
8,6	5,7	85,7	1,37	1,33	4,6	12,8	82,6	2,56	2,41
8,4	6,1	85,5	1,40	1,36	4,4	13,2	82,4	2,68	2,51
8,2	6,4	85,4	1,44	1,40	4,2	13,5	82,3	2,81	2,62
8,0	6,8	85,2	1,47	1,43	4,0	13,9	82,1	2,94	2,75

Таблица 11. Состав продуктов полного сгорания попутных газов

CO₂'	O₂'	N₂'	h	α	CO₂'	O₂'	N₂'	h	α
13,0	0,0	87,0	1,00	1,00	8,8	6,8	84,4	1,48	1,44
12,6	0,6	86,7	1,03	1,03	8,6	7,1	84,3	1,51	1,46
12,4	1,0	86,6	1,05	1,04	8,4	7,4	84,2	1,55	1,50
12,2	1,3	86,5	1,06	1,05	8,2	7,7	84,1	1,58	1,53
12,0	1,6	86,4	1,08	1,07	8,0	8,1	83,9	1,62	1,56
11,8	1,9	86,3	1,10	1,09	7,8	8,4	83,8	1,67	1,61
11,6	2,2	86,2	1,12	1,11	7,6	8,7	83,7	1,71	1,65
11,4	2,6	86,0	1,14	1,13	7,4	9,0	83,6	1,76	1,68
11,2	2,9	85,9	1,16	1,15	7,2	9,4	83,4	1,81	1,74
11,0	3,2	85,8	1,18	1,16	7,0	9,7	83,3	1,86	1,78
10,8	3,5	85,7	1,20	1,18	6,8	10,0	83,2	1,91	1,83
10,6	3,9	85,5	1,23	1,21	6,6	10,3	83,1	1,97	1,88
10,4	4,2	85,4	1,25	1,23	6,4	10,7	82,9	2,03	1,94
10,2	4,5	85,3	1,27	1,25	6,2	11,0	82,8	2,10	2,00
10,0	4,8	85,2	1,30	1,27	6,0	11,3	82,7	2,17	2,06
9,8	5,1	85,1	1,33	1,30	5,8	11,6	82,6	2,24	2,13
9,6	5,5	84,9	1,35	1,32	5,6	12,0	82,4	2,32	2,20
9,4	5,8	84,8	1,38	1,35	5,4	12,3	82,3	2,41	2,28
9,2	6,1	84,7	1,41	1,37	5,2	12,6	82,2	2,50	2,37
9,0	6,4	84,6	1,44	1,40	5,0	12,9	82,1	2,60	2,46

Все теплотехнические расчеты, связанные с определением тепловых потерь производились по упрощенной методике теплотехнических расчетов профессора М.Б.Равича. Согласно этой методике потери с уходящими газами определялись по формуле:

$$q_2 = 0,01(t_{yx} - t_{xb}) \times Z$$

где: t_{yx} - температура уходящих газов, °С

t_{xb} - температура воздуха, поступающего на горение, °С

$Z = ((C' + (h-1) \cdot BK) / t_{\max}') \cdot 10^4$, где:

C' – отношение средневзвешенной теплоемкости не разбавленных воздухом продуктов сгорания в температурном интервале от °С до температуры отходящих газов к их теплоемкости в температурном интервале от °С до t_{\max} .

K - отношение средней теплоемкости 1м воздуха в температурном интервале от °С до $t_{o.g}$ к средней теплоемкости не разбавленных воздухом продуктов сгорания в температурном интервале от °С до t_{\max} .

B - отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания.

t_{\max} - жаропроизводительность или максимальная температура, которая может быть получена при полном сгорании газа в теоретически необходимом объеме сухого воздуха при температуре 0 °С и отсутствие потерь теплоты.

q_5 – потери тепла в окружающую среду.

При нагрузках котлов, отличающихся от номинальной, эти потери тепла пересчитывались по формуле:

$$q_5^d = q_5^{\text{ном}} Q^{\text{ном}} / Q^{\phi},$$

где: $q_5^{\text{ном}}$ - потери тепла в окружающую среду при номинальной нагрузке, % - принимались по паспортным данным котлов.

$Q^{\text{ном}}$, Q^{ϕ} - соответственно номинальная и фактическая теплопроизводительность котла, Гкал.

Коэффициент избытка воздуха подсчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 \times (O_2 - 0,5 \times CO - 0,5 \times H_2 - 2 \times CH_4)}$$

где N_2 , O_2 , CO , H_2 , CH_4 содержание компонентов в продуктах сгорания,

Отношение действительного и теоретического объемов сухих продуктов сгорания - коэффициент разбавления продуктов сгорания избыточным воздухом, определялось по формуле:

$$RO_2^{\max}$$

$$h = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}$$



Расчетный параметр Z для проведения теплотехнических расчетов определялся по методике профессора М.Б. Равича.

Потери тепла от химической неполноты сгорания определялись по формуле:

$$q_3 = \frac{(30,2 \times \text{CO} + 25,8 \times \text{H}_2) \times h}{P}, \%$$

где: $P=1000 \text{ ккал/м}^3$ для природного газа.

Коэффициент полезного действия котла “брутто” определялся по формуле:

$$n_o^{\text{бр}} = 100 - q_2 - q_3 - q_5, \%$$

Удельный расход топлива на выработку 1 Гкал тепла:

$$B = \frac{10^6}{Q_p \times n_k^{\text{бр}}}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

Удельный расход условного топлива на отпущенную 1 Гкал:

$$B_y = \frac{10^6}{7000 \times n_k^{\text{нг}}}, \text{ кг у.т./Гкал}$$

$n_k^{\text{нг}}$ - коэффициент полезного действия котельной

$n_k^{\text{нг}} = n_k^{\text{бр}} - q_{\text{с.н.}}$

$q_{\text{с.н.}}$ - расход тепла на нужды котла.