

Б. А. СОКОЛОВ

# КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

*Рекомендовано  
Федеральным государственным учреждением  
«Федеральный институт развития  
образования» в качестве учебного пособия  
для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих  
программы начального профессионального  
образования по подготовке и переподготовке  
кадров по профессии 140101.01  
«Машинист котлов»*

*Регистрационный номер рецензии 131  
от 14 мая 2010 г. ФГУ «ФИРО»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2012

УДК 621.182/.183:621.039.542.3(075.9)

ББК 31.361:31.352я75

С594

*Серия «Непрерывное профессиональное образование»*

Рецензент —

зам. директора НОУ Тушинский учебный комбинат *В.М.Полякова*

**Соколов Б. А.**

**С594** Котельные установки, работающие на твердом топливе : учеб. пособие / Б.А.Соколов. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 64 с.

ISBN 978-5-7695-5804-7

Рассмотрены принципы работы и конструкции котлов, работающих на твердом топливе. Приведены сведения о твердых энергетических топливах и организации их сжигания. Освещено вспомогательное оборудование котельных: дутьевые вентиляторы, дымососы, питательные устройства котлов и система подачи топлива в топку котла, шлакозолоудаление.

Учебное пособие может быть использовано при освоении ПМ.01 «Обслуживание блочной системы управления агрегатами (котел-турбина)» и ПМ.02 «Обслуживание котлов» по профессии 140101.01 «Машинист котлов» в учреждениях начального профессионального образования.

Для подготовки, переподготовки и повышения квалификации рабочих по профессии «Машинист (кочегар) котельной».

УДК 621.182/.183:621.039.542.3(075.9)

ББК 31.361:31.352я75

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Соколов Б. А., 2012

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-7695-5804-7

## К читателю

На тепловых электрических станциях, в производственных и отопительных котельных широкое распространение находят котлы для выработки пара и горячей воды, работающие на твердом топливе.

Современные котельные установки, работающие на твердом топливе, — это сложные агрегаты, и для их обслуживания от операторов требуются специальные знания как о свойствах твердого топлива и методах его сжигания, так и об особенностях многообразных конструкций самих котельных агрегатов.

Данное учебное пособие содержит сведения теоретического и практического характера, необходимые оператору для выработки навыков эксплуатации котельных установок.

Благодаря учебному пособию вы будете **знать**:

- основные теплотехнические характеристики твердого топлива;
- составы продуктов полного и неполного сгорания топлива;
- порядок выполнения расчетов горения твердого топлива, выхода продуктов его сжигания, статей теплового баланса котла и его коэффициента полезного действия;
- принцип работы и конструктивное оформление наиболее распространенных паровых и водогрейных котлов.

Благодаря учебному пособию вы будете **уметь**:

- определять коэффициент избытка воздуха;
- составлять тепловой баланс котла;
- определять коэффициент полезного действия котла;
- выполнять подготовку котла и вспомогательного оборудования к работе.

# 1

## Твердое топливо и его сжигание

### 1.1

#### Состав и теплотехнические характеристики твердого топлива

Твердые органические топлива представляют собой сложные химические соединения горючих и негорючих веществ. Основными химическими элементами, входящими в состав твердого топлива, являются углерод С, водород Н, кислород О, азот N и сера S. Помимо указанных элементов в составе твердого топлива имеется влага  $W$  и негорючие минеральные вещества, образующие при сжигании золу  $A$ . Золу и влагу называют **внешним балластом** топлива.

Топливо в том виде, в каком оно поступает непосредственно к потребителю, называется рабочим топливом, а его масса — рабочей массой. Процентное содержание указанных химических элементов вместе с составляющими внешнего балласта в рабочей массе топлива называют **элементарным составом рабочей массы** топлива, для выражения которого используют формулу  $C^p + H^p + O^p + N^p + S_{\text{орг+к}}^p + A^p + W^p = 100\%$ , где верхний индекс «р» указывает на то, что состав относится к рабочей массе топлива, а нижний «орг + к» — на источник серы (органическая и колчеданная).

Для одного и того же топлива количество минеральных примесей, дающих золу  $A^p$ , и влажность  $W^p$  могут изменяться в широких пределах в зависимости от условий добычи топлива, его транспортировки, хранения и др. Для удобства сравнительной оценки теплотехнических свойств разных сортов топлива используются понятия сухой, горючей и органической масс топлива. Обозначение составляющих элементарного состава этих масс топлива такое же, как и для рабочей массы, но соответственно с индексами «с», «г» и «о» вместо индекса «р».

**Сера** в элементарном составе **топлива** может присутствовать в трех видах:  $S_{\text{орг}}$  — органическая (сера в составе высокомолекулярных органических соединений топлива);  $S_{\text{к}}$  — колчеданная (сульфиды металлов, чаще всего  $\text{FeS}_2$ );  $S_{\text{с}}$  — сульфатная (сера сульфатов  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ , которая входит в минеральную часть топлива). Органическая и колчеданная сера  $S_{\text{орг+к}}$  при горении топлива окисляется с выделением теплоты, а сульфатная сера при температурах горения топлива окислению не подвергается и переходит в золу.

Различие рабочей, сухой, горючей и органической масс топлива схематично показано на рис. 1.1. Приведенные в табл. 1.1 составы рабочей

Углерод С	Водород Н	Кислород О	Азот N	Сера S		Зола A	Влага W
				органи- ческая S <sub>орг</sub>	колчедан- ная S <sub>к</sub>		
← Органическая масса топлива →							
← Горючая масса топлива →							
← Сухая масса топлива →							
← Рабочая масса топлива →							

**Рис. 1.1.** Состав топлива

массы и низшая теплота сгорания некоторых твердых топлив являются их расчетными характеристиками.

Состав рабочей массы топлива — важнейшая характеристика, определяющая в дальнейшем целый ряд его показателей. Основным горючим компонентом этих топлив является *углерод*, при сгорании которого выделяется теплота — 34,4 МДж/кг. Содержание углерода в горючей массе С<sup>г</sup> изменя-

**Таблица 1.1.** Расчетные характеристики твердых топлив

Месторождение и марка топлива	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг
	W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	S <sub>орг+к</sub> <sup>p</sup>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>	
Уголь Кузнецкий Д	12,0	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	22,84
» Кузнецкий Г	8,5	11,0	0,5	66,0	4,7	1,8	7,5	26,15
» Грамотеинский Г	14,0	9,5	0,5	59,5	4,0	1,5	11,0	22,84
» Подмосковский Б	32,0	25,2	2,7	28,7	2,2	0,6	8,6	10,43
» Воркутинский Ж	5,5	23,6	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	23,67
» Интинский Д	11,0	25,4	2,6	47,7	3,2	1,3	8,8	18,31
» Бабаевский Б	56,5	7,0	0,5	25,4	2,4	0,2	8,0	8,76
» Егоршинский ПА	8,0	23,9	0,4	60,3	2,5	0,9	4,0	22,42
» Назаровский Б	39,0	7,3	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	23,03
Сланец горючий (Ленинградская обл.)	11,5	60,0	1,7	20,6	2,7	0,1	2,8	5,82
То же (Саратовская обл.)	17,5	59,2	3,4	13,5	1,8	0,3	4,3	8,13
Торф фрезерный	50,0	6,3	0,1	24,7	2,6	1,1	15,2	10,22

ется в пределах от 50 % в древесине до 95 % в антраците, т.е. углерод — основной источник тепловыделения топлива. Вторым по значению горючим компонентом топлива является **водород**, при сгорании которого выделяется 119 МДж/кг. Входящая в состав твердых топлив горючая **сера** окисляется при горении топлива с образованием сернистого газа  $\text{SO}_2$ , обеспечивая тепловыделение 9,3 МДж/кг. Образующийся при сжигании серы  $\text{SO}_2$  является токсичным и коррозионно-активным, приводящим к интенсивной коррозии металлических элементов топливоиспользующих установок.

**Кислород** и **азот** считаются внутренним балластом твердого топлива, а **зола** и **влага** — внешним, так как повышение содержания золы и влаги в рабочей массе топлива приводит к уменьшению его горючей массы, а значит к снижению тепловыделения при сгорании топлива. При сжигании влажных топлив затрачивается теплота на нагрев и испарение влаги, перегрев образующихся водяных паров, что дополнительно уменьшает количество выделившейся теплоты, а соответственно, и температуру горения.

**Зола топлива** — минеральный остаток, получаемый при полном сгорании топлива. Зола образуется из его минеральных примесей, содержание которых зависит от вида топлива: в древесном топливе 1...2 %, в угле 10...40 %, в горючих сланцах до 70 %.

В процессе горения минеральные примеси могут из твердого состояния переходить в жидкое (раствор минералов называется **шлаком**). По температуре плавления зола топлива может быть легкоплавкой ( $t_3 < 1350^\circ\text{C}$ ), среднеплавкой ( $t_3 = 1350...1450^\circ\text{C}$ ), тугоплавкой ( $t_3 > 1450^\circ\text{C}$ ). Повышенное содержание золы в топливе снижает технико-экономические показатели работы котлов из-за увеличения затрат на шлако- и золоудаление, очистку поверхностей нагрева от загрязнения, газоочистку, а также увеличения теплотеперь со шлаком и золой.

**Влага твердого топлива** бывает внешней и внутренней. Источниками внешней влаги являются поверхностные и грунтовые воды, влага атмосферного воздуха. Эта влага при транспортировке и хранении топлива находится на поверхности его кусков, проникает в капилляры и поры, особо развитые у торфа и бурых углей. Внешняя влага может быть удалена сушкой топлива (обычно при температуре примерно  $105^\circ\text{C}$ ). Внутренняя влага — это коллоидная и гидратная (кристаллогидратная) вода (входит в химическую формулу веществ). Повышение влажности топлива приводит к снижению его теплоты сгорания, увеличению объема продуктов горения (ПГ) и снижению температуры горения. В результате уменьшается производительность котлов и увеличивается расход топлива. Повышенная влажность ухудшает сыпучесть топлива, а в зимнее время из-за смерзания затрудняются условия транспортирования и использования топлива.

**Теплота сгорания** — количество теплоты, МДж, выделяющееся при полном сгорании 1 кг топлива — зависит от агрегатного состояния влаги в ПГ, которая выделяется из топлива при сушке, а также образуется от сгорания водорода и может находиться в парообразном или в жидком виде. Если в ПГ

все водяные пары конденсируются, образуя жидкую фазу, то получают высшую теплоту сгорания  $Q_B$ , а если же конденсации водяного пара не происходит, то низшую теплоту сгорания  $Q_H$ . Разность высшей и низшей теплоты сгорания равна теплоте конденсации водяных паров, содержащихся в ПГ топлива. В реальных условиях ПГ топлив в подавляющем большинстве случаев покидают котельные установки при температуре более высокой, чем температура, называемая температурой *точки росы*, при которой происходит конденсация содержащихся в них водяных паров. При этом теплота конденсации водяных паров полезно не используется и в теплотехнических расчетах не учитывается, а используется величина низшей теплоты сгорания рабочей массы топлива  $Q_H^p$ . Все твердые топлива при нагревании без доступа воздуха подвергаются термическому распаду с выделением горючих ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_mH_n$ ) и негорючих ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) газов, составляющих *выход летучих* топлива, и образованием твердого остатка — *кокса*, в составе которого находятся углерод и прокаленные минеральные примеси (*зола*). Выход летучих относят на горючую массу топлива и обозначают  $V^T$ . Летучие топлив играют существенную роль при их воспламенении и на начальных стадиях горения, так как в значительной мере определяют реакционную способность твердых топлив. Так, для некоторых видов твердого топлива выход летучих  $V^T$  и температура начала их выделения  $T_H$  составляют:

	$V^T$ , %	$T_H$ , К
Горючие сланцы .....	80 ... 90	500
Торф.....	65 ... 75	370
Бурые угли .....	30 ... 60	420 ... 440
Антрациты.....	2 ... 9	670

## 1.2

## Классификация твердого топлива

В зависимости от состава твердого топлива, выхода летучих, спекаемости кокса, высшей теплоты сгорания рабочей массы ископаемые угли делятся на три основных типа: бурые, каменные и антрациты.

К *бурым углям* относят угли с высшей теплотой сгорания рабочей массы беззольного угля  $100Q_B^p/(100 - A^p) < 23,88$  МДж/кг. Бурые угли характеризуются высоким выходом летучих  $V^T > 40\%$ , неспекающимся коксовым остатком и в большинстве случаев высокой влажностью. По содержанию влаги бурые угли делятся на три группы:  $B_1$  ( $W^p > 40\%$ );  $B_2$  ( $W^p = 30 \dots 40\%$ ) и  $B_3$  ( $W^p < 30\%$ ).

К *каменным углям* относят угли с высшей теплотой сгорания рабочей массы беззольного угля  $100Q_B^p/(100 - A^p) > 23,88$  МДж/кг и выходом летучих  $V^T > 9\%$ . Основная масса их поддается спеканию. Каменные угли делятся на марки по выходу летучих и характеристике твердого остатка (табл. 1.2).

**Таблица 1.2. Марки каменных углей**

Марка углей	Обозначение марки	Выход летучих на горючую массу $V^r$ , %	Характеристика твердого остатка
Длиннопламенный	Д	36 и более	От порошкообразного до слабоспекшегося
Газовый	Г	35 и более	Спекшийся
Газовый жирный	ГЖ	31 ... 37	»
Жирный	Ж	24 ... 37	»
Коксовый жирный	КЖ	25 ... 33	»
Коксовый	К	17 ... 38	»
Отощенный спекающийся	ОС	14 ... 27	»
Тощий	Т	9 ... 17	От порошкообразного до слабоспекшегося
Слабоспекающийся	СС	17 ... 37	То же

К *антрацитам* (и полуантрацитам) относят угли, имеющие выход летучих в горючей массе топлива менее 9 %.

**1.3****Расчеты горения твердого топлива. Продукты полного и неполного сгорания топлива**

В основе процесса горения твердого топлива лежат химические реакции окисления горючих компонентов топлива: углерода С, водорода Н и серы S. В качестве окислителя в процессах горения топлива в котельных агрегатах используется кислород  $O_2$  атмосферного воздуха (содержит 21 об. % кислорода и 79 об. % азота).

*Горение углерода* при полном его окислении происходит по реакции



в которой с учетом молекулярных масс образуется масса  $CO_2$ :

$$12 \text{ кг} + 32 \text{ кг} = 44 \text{ кг},$$

т.е. для сжигания 1 кг С необходимо  $32/12 = 2,667$  кг  $O_2$ , или с учетом плотности кислорода  $\rho_{O_2}$  при нормальных условиях

$$2,667/1,428 = 1,866 \text{ м}^3 O_2/\text{кг С}.$$



**Горение водорода** происходит по реакции



$$2 \text{ кг} + 16 \text{ кг} = 18 \text{ кг},$$

т.е. для сжигания 1 кг  $\text{H}_2$  нужно 8 кг  $\text{O}_2$ , или  $5,56 \text{ м}^3 \text{ O}_2/\text{кг H}_2$ .

**Горение серы** происходит по реакции



$$32 \text{ кг} + 32 \text{ кг} = 64 \text{ кг}$$

т.е. для сжигания 1 кг S необходим 1 кг  $\text{O}_2$ , или  $0,7 \text{ м}^3 \text{ O}_2/\text{кг S}$ .

Теоретический расход кислорода,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , необходимый для полного сгорания 1 кг твердого топлива с учетом кислорода  $\text{O}^p$ , содержащегося в рабочей массе топлива,  $V_{\text{O}_2}^0 = 1,866 \frac{C^p}{100} + 5,56 \frac{H^p}{100} + 0,7 \frac{S_{\text{орг+к}}^p}{100} - \frac{\text{O}^p}{100\rho_{\text{O}_2}}$ , где  $\rho_{\text{O}_2}$  — плотность кислорода при нормальных условиях ( $\rho_{\text{O}_2} = 1,428 \text{ кг}/\text{м}^3$ ).

Если в качестве окислителя используется не кислород, а воздух, его теоретический расход составит  $V_{\text{в}}^0 = V_{\text{O}_2}^0 \frac{100}{21} = 4,76V_{\text{O}_2}^0 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

На практике при сжигании топлива воздуха подают несколько больше, чем это требуется теоретически. Отношение действительного расхода воздуха  $V_{\text{в}}^a$ , подаваемого на сжигание топлива, к его теоретическому значению  $V_{\text{в}}^0$  называется **коэффициентом избытка воздуха**  $\alpha = V_{\text{в}}^a/V_{\text{в}}^0$ . Значение коэффициента избытка воздуха зависит от вида сжигаемого топлива, конструкции горелочного и топочного устройств и для твердого топлива обычно находится в пределах 1,2... 1,5.

В общем случае для всех видов топлива теоретический суммарный выход продуктов полного сгорания,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , можно представить в виде

$$V_{\text{п.г}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0,$$

где  $V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$  — объем сухих трехатомных газов;  $V_{\text{N}_2}^0, V_{\text{H}_2\text{O}}^0$  — объемы азота и паров воды при теоретически полном сгорании топлива.

При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$  и полном сгорании топлива газообразные продукты не содержат кислород и состоят из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Для твердых топлив выход трехатомных сухих продуктов сгорания с учетом ранее приведенных реакций горения (1)—(3) составит,  $\text{м}^3/\text{кг}$ :

$$V_{\text{RO}_2} = 1,866 \frac{C^p}{100} + 0,7 \frac{S_{\text{орг+к}}^p}{100}.$$

Теоретический объем азота,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , переходящего в ПГ из воздуха и топлива, составит  $V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V_{\text{в}}^0 + 0,008N^p$ .

Теоретический объем водяного пара,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , определяется в виде суммы:  $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0124d_{\text{в}}V_{\text{в}}^0 + 1,24G_{\text{ф}}$ , в которой первое сла-

гаемое — объем водяного пара, образующегося при сгорании водорода рабочей массы, второе — влага, внесенная топливом, третье — влага, внесенная с воздухом ( $d_v$  — влагосодержание воздуха, г/м<sup>3</sup>), и четвертое — влага форсуночного или дутьевого пара ( $G_\phi$  — расход пара на распыл, кг/кг топлива). Выход ПГ при сжигании топлива в условиях избытка воздуха ( $\alpha > 1$ ) возрастает, т.е.  $V_{с.п.г} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V_B^0$ ;  $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_B^0$ ;  $V_{п.г} = V_{с.п.г} + V_{H_2O}$ , где  $V_{с.п.г}$  — выход сухих продуктов горения.

**Условия, необходимые для полного сгорания топлива:** непрерывный подвод топлива в зону горения; непрерывный подвод окислителя в достаточном количестве; хорошее перемешивание топлива с окислителем; достаточная температура в топке; достаточное время пребывания топливовоздушной смеси в топке. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то появляются продукты неполного сгорания топлива.

При полном сгорании любого топлива с теоретически необходимым количеством воздуха состав ПГ можно выразить через сумму содержаний  $CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 = 100$  об. %. При полном сгорании топлива и избытке окислителя ( $\alpha > 1$ ) в ПГ будет присутствовать избыточный кислород, тогда их состав:  $CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 + O_2 = 100$  об. %. При недостатке окислителя или плохом перемешивании сгорание топлива будет неполным, и ПГ будут содержать горючие газы — вначале монооксид углерода CO, затем водород  $H_2$  и метан  $CH_4$ . Таким образом, в общем случае полный состав ПГ при сжигании топлива с недостатком окислителя ( $\alpha < 1$ ) выражается суммой  $CO_2 + H_2O + N_2 + CO + H_2 + CH_4 = 100$  об. %. Помимо газообразных компонентов ПГ могут содержать сажу.

По анализу состава ПГ можно судить о процессе сжигания топлива. Прежде всего следует обращать внимание на содержание CO. Его отсутствие в данных анализа свидетельствует о полном сгорании топлива и отсутствии потерь теплоты от химической неполноты сгорания. При наличии CO в продуктах сгорания необходимо увеличить подачу воздуха с таким расчетом, чтобы исключить его образование или выйти на его минимальное значение в соответствии с производственной инструкцией или режимной картой.

Отсутствие CO в составе ПГ вовсе не свидетельствует о качественном сжигании топлива. Помимо CO необходимо знать содержание кислорода или трехатомных газов  $RO_2$  в сухих ПГ. С помощью данных о содержании этих компонентов можно установить важнейший показатель качества сжигания топлива — коэффициент избытка воздуха. Наиболее точно значение  $\alpha$  подсчитывается по «азотной» формуле, которая для случая полного сжигания топлива имеет вид  $\alpha = N_2 / (N_2 - 3,76O_2)$ , где  $N_2$ ,  $O_2$  — содержание азота и кислорода в сухих ПГ, об. %; 3,76 — отношение содержаний  $N_2/O_2$  в воздухе;  $N_2 = 100 - (RO_2 + O_2)$ .

Примерное значение коэффициента избытка воздуха можно определить по «кислородной» формуле. Для полного сгорания топлива  $\alpha = 21 / (21 - O_2)$ , где  $O_2$  — содержание кислорода в ПГ.