

Водогрейный котел для автономного теплоснабжения* на местном топливе

Каравайков В. М., доктор техн. наук, Алутин А. П., Иванов Е. Э., инженеры

Костромской государственной технологической университет

Приведены результаты испытаний водогрейного пиролизного котла, использующего твердое местное топливо. Испытываемый водогрейный котел обеспечивает производство тепловой энергии с выходной мощностью от 8 до 120 кВт. Его КПД определен в пределах от 75 до 83 %. Наиболее стабильная работа котла выявлена при сжигании торфа в брикетах. При сжигании дров он обеспечивает выходную мощность в диапазоне от 6 до 140 кВт при их влажности до 50 %. Работа котла в экономичном режиме достигается при средних тепловых потерях зданием в отопительный период 40 – 60 кВт.

Ключевые слова: водогрейный котел, автономное теплоснабжение, местное топливо, состав дымовых газов.

В данной статье представлены результаты балансовых испытаний водогрейного котла (рис. 1), которые были проведены с целью определения его теплотехнических параметров. Испытания проводили при установившемся тепловом состоянии системы автономного теплоснабжения с обязательным сведением теплового баланса котла (требование поддержания постоянства его заданной нагрузки во время замеров параметров является обязательным). Техническая характеристика топлива (зольность, влажность, выход летучих и др.) соответствовала расчетной или среднеэксплуатационной.

Во время испытаний при разном качестве и количестве сжигаемого топлива измеряли про-

изводительность котла, температуру прямой $t_{пр}$ и обратной $t_{обр}$ сетевой воды, определяли состав и температуру газов за котлом. Для замера расхода сетевой воды был установлен водомер на линии обратной сетевой воды. Давление и температуру прямой сетевой воды измеряли с помощью приборов, размещенных в верхней части корпуса котла. Для отбора газов на анализ применяли газоотборную трубку, которую устанавливали в специальное отверстие в газоходе на выходе из котла. В этом же месте измеряли температуру уходящих газов $\vartheta_{ух}$. Показания всех приборов котла и результаты анализа проб газов фиксировали одновременно через каждые 15 мин и заносили в журнал наблюдений. Для обеспечения достоверности испытаний проводили по три замера каждого параметра, затем определяли средние за период испытаний значения, по которым рассчитывали КПД котла брутто $\eta_{бр.об}$ методом обратного баланса и расход топлива.

Определение КПД брутто водогрейного котла методом прямого баланса** основано на измерениях количества подведенной и использованной теплоты путем непосредственных замеров расхода топлива, воды и ее параметров и расчета по формуле

$$\eta_{бр.пр} = \frac{Q_1}{Q_H^P} \cdot 100 = \frac{D_B (h_{пр} - h_{обр})}{B Q_H^P} \cdot 100, \quad (1)$$

где Q_1 — полезно использованная теплота, кДж; D_B — расход сетевой воды через котел, кг/с; $h_{пр}$, $h_{обр}$ — соответственно энтальпии прямой и обратной сетевой воды, кДж/кг; Q_H^P —



Рис. 1

* Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации. Государственный контракт № 14.740.11.1373.

** Теплотехнический справочник / Под общ. ред. В. Н. Юрнева и П. Д. Лебедева, т. 2. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976.

низшая удельная теплота сгорания рабочей массы твердого топлива, кДж/кг; B — расход топлива, кг.

Состав топлива и значение Q_H^p должны определяться в химической лаборатории, а для известной марки топлива могут быть приняты по справочным данным.

Определение КПД брутто котла методом обратного баланса (см. сноску **) осуществляется косвенным путем и основывается на измерении тепловых потерь водогрейного котла. При этом составление его теплового баланса заключается в установлении равенства между располагаемой теплотой топлива Q_H^p и полезно использованной теплотой Q_1 , а также суммарными тепловыми потерями.

Уравнение теплового баланса, отнесенное к единице количества топлива, имеет вид:

$$Q_H^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (2)$$

а если располагаемая теплота принята за 100 %, то

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100. \quad (3)$$

Отсюда КПД котла по методу обратного баланса

$$q_1 = \eta_{бр}^{обп} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \quad (4)$$

где q_1 — полезно использованная теплота, отнесенная к располагаемой теплоте и представляющая собой КПД брутто; $q_2 - q_6$ — потери теплоты с уходящими газами, из-за химической неполноты сгорания топлива, механического недожога, в окружающую среду с ограждающей поверхности котла, с физической теплотой шлаков.

При одинаковой точности замеров метод обратного баланса обеспечит большую точность определения КПД по сравнению с методом прямого баланса, поэтому он используется как основной при балансовых испытаниях водогрейных котлов. При этом требуются дополнительно: измерение температуры уходящих газов (ϑ_{yx} , °C); газовый анализ уходящих газов ($RO_2 = CO_2 + SO_2$; O_2 , %).

Определение коэффициента избытка воздуха по газовому анализу продуктов сгорания (см. сноску **). Коэффициент избытка воздуха α — это отношение действительного количества воздуха V_d , поданного в топочную камеру котла, к теоретически необходимому для горения V^0 :

$$\alpha = \frac{V_d}{V^0}.$$

Значение α зависит от состава и вида топлива, топочного режима, степени совершенства смешения топлива с воздухом и др. Если известен химический состав газов, получаемых при сгорании топлива, коэффициент избытка воздуха может быть определен по “азотной” формуле, которая для случая полного горения топлива имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2},$$

где N_2 — содержание азота в сухих продуктах горения, %.

При наличии химической неполноты горения коэффициент α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76[O_2 - 0,5(CO + H_2) - 2CH_4 - 3C_nH_m]}.$$

Если содержание кислорода O_2 в дымовых газах измерено по кислородомеру, то значение α может быть найдено приближенно по “кислородной” формуле:

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O_2}.$$

Количество азота в продуктах сгорания, %, может быть вычислено по формуле

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4 + 2C_nH_m).$$

В таком виде “азотная” формула справедлива для топлив, в которых содержится меньше 3 % азота.

Определение тепловых потерь котла. Потери теплоты с уходящими газами q_2 определяются разницей энтальпий газов на выходе котла h_{yx} и холодного воздуха, поступающего в котел $h_{x.в}^0$. Значения энтальпий h_{yx} и $h_{x.в}^0$ могут быть рассчитаны согласно рекомендациям нормативного расчета котельных агрегатов. Тогда

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} (100 - q_4) = \frac{H_{yx} - \alpha_{yx} H_{x.в}^0}{Q_p^p} (100 - q_4).$$

Потери теплоты от химической неполноты сгорания q_3 определяются суммарной теплотой сгорания продуктов неполного горения, кДж/кг, остающихся в уходящих газах:

$$Q_3 = 237(C_2^p + 0,375S_{п2}^p) \frac{CO}{RO_2 + CO} \frac{100 - q_4}{100}.$$

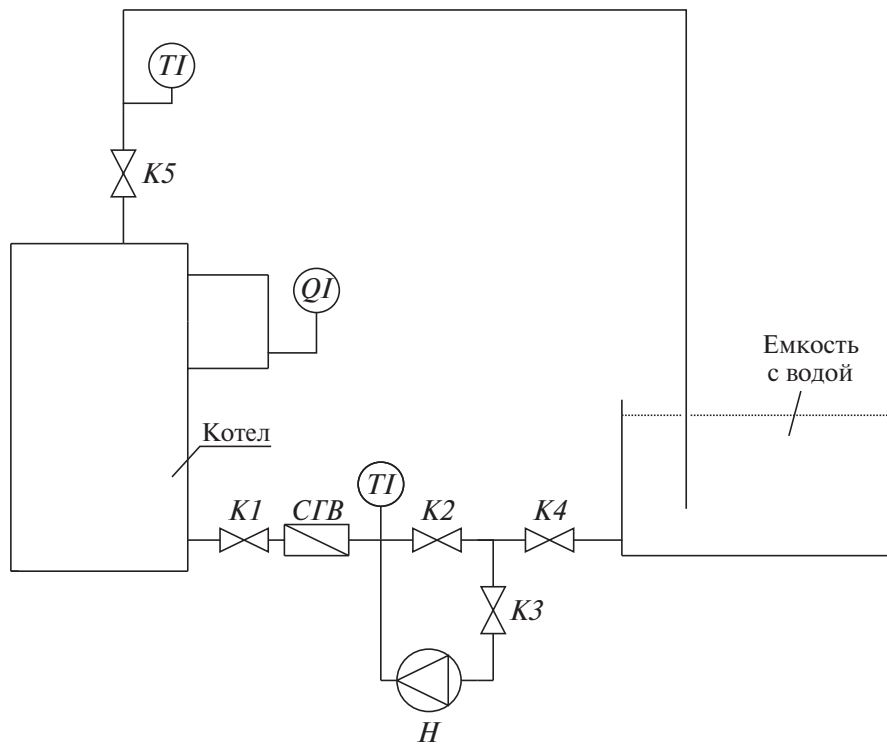


Рис. 2

Эти потери могут быть выражены в процентах от располагаемой теплоты:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p^p} \cdot 100.$$

Потери теплоты от механического недожога допускается принимать на основе нормативов. При сжигании дров $q_4 = 1,0 \div 1,5 \%$.

Потери теплоты в окружающую среду q_5 за счет естественной конвекции и излучения наружными поверхностями агрегата изменяются в зависимости от тепловой нагрузки котла. Для водогрейных котлов на твердом топливе потери теплоты можно принять равными 5%. При нагрузках, отличающихся от номинальной более чем на 25%, значение q_5 уточняется по формуле

$$q_5 = q_5^{\text{НОМ}} \frac{D_{\text{НОМ}}}{D}.$$

Потери теплоты с физической теплотой шлаков q_6 учитываются при сжигании многозольных топлив, для которых соблюдается неравенство $A^p \geq 2,5 \cdot 10^{-3} Q_H^p$:

$$q_6 = a_{\text{шл}} A_H^p c_{\text{шл}} t_{\text{шл}} / 100,$$

где $a_{\text{шл}}$ — доля золы в шлаке; A^p — зольность топлива на рабочую массу, %; $c_{\text{шл}}$, $t_{\text{шл}}$ — теплоемкость и температура шлака.

Перед испытаниями котел был оснащен оборудованием и приборами, указанными на рис. 2: K1–K5 — запорная арматура; TI — измерители температуры; QI — газоанализатор; СГВ — счетчик горячей воды; Н — насос.

Перед началом испытаний провели пробное тестирование работы котла, во время которого проверяли узлы подключений на наличие утечек и правильность показаний подключенных приборов. Были также определены объемы воды в котле и в емкости, расход воды при работе с насосом Wilo 25/6.

В процессе балансовых испытаний котел работал при трех режимах:

интенсивном — режиме поддержания теплоты при максимальных потерях теплоты зданием в наиболее холодный период отопительного сезона (соответствует номинальной мощности котла);

экономичном — режиме поддержания теплоты при средней температуре наружного воздуха отопительного периода;

минимальном — режиме поддержания теплоты в переходные отопительные периоды при плюсовой наружной температуре (соответствует минимально возможной мощности котла).

Порядок выполнения измерений был следующий. После растопки котла измеряли

температуру прямой и обратной воды через каждые 10 мин. При этом фиксировали режим, при котором разности температур оставались неизменными. Тот или иной режим поддерживали закладкой топлива, регулировкой подачи воздуха в топку и камеру дожига, а также шибером на выходе дымовых газов из котла.

Полезную мощность котла, кВт, определяли по формуле

$$N_p = c_v(t_{пр} - t_{обр})Q_H, \quad (5)$$

где $c_v = 4,19$ кДж/(кг · К) — теплоемкость воды; Q_H — производительность сетевого насоса ($Q_H = 0,6$ л/с для Wilo 25/6 и $Q_H = 1,4$ л/с для Wilo 50/6).

Средняя полезная мощность котла за период испытаний

$$N_{ср} = 1,05c_v(t_{обр.к} - t_{обр.н})\rho V/\tau, \quad (6)$$

где $t_{обр.к}$ и $t_{обр.н}$ — конечная и начальная температуры обратной воды, °С; $\rho = 1$ л/кг — плотность воды; $V = 1150$ л — объем емкости с водой; τ — продолжительность испытаний.

Таблица 1

Этап испытаний	Текущее время, ч-мин	Температура сетевой воды, °С	
		$t_{обр}$	$t_{пр}$
Топливо — дрова сухие и влажные (средняя влажность — 40 %)			
Розжиг котла	12-55	25	25
Промежуточный замер	13-05	27	30
Промежуточный замер	13-15	33	43
Начало стабильного горения дров	13-25	39	80
Окончание испытаний	14-10	60	100
Мощность котла, кВт:			
N_p		103	
$N_{ср}$		41	
Топливо — торф фрезерный, масса топлива — 20 кг			
Розжиг котла	13-45	51	51
Начало горения торфа	13-55	58	60
Окончание испытаний	18-47	78	78
Мощность котла, кВт:			
N_p		5	
$N_{ср}$		6	
Топливо — дрова сухие (влажность — 25 %)			
Розжиг котла	10-50	20	20
Начало стабильного горения дров	11-10	36	42
Переход на экономичный режим	11-20	42	48
Анализ уходящих газов	11-30	48	54
Окончание испытаний	11-50	60	70
Мощность котла, кВт:			
N_p		50,3	
$N_{ср}$		56,5	

Окончание табл. 1

Этап испытаний	Текущее время, ч-мин	Температура сетевой воды, °С	
		$t_{обр}$	$t_{пр}$
Топливо — торф в брикетах			
Розжиг котла	9-00	20	20
Начало стабильного горения торфа	9-20	32	38
Переход на режим минимальной мощности	10-50	86	87
Промежуточный замер параметров	11-00	87	88
Анализ уходящих газов	11-10	88	89
Переход на интенсивный режим	11-30	90	98
Окончание испытаний	11-38	100	100
Мощность котла, кВт: N_p $N_{ср}$		8,8 8,8	
Топливо — дрова свежесрубленные (влажность — 50 %)			
Розжиг котла	9-30	70	70
Начало стабильного горения дров	9-50	74	78
Переход на режим минимальной мощности	10-30	90	91,5
Анализ уходящих газов	11-40	91	92,5
Окончание испытаний	11-50	92	93,5
Мощность котла, кВт: N_p $N_{ср}$		8,8 8,8	

Таблица 2

Параметры	1-й замер	2-й замер	3-й замер
Содержание уходящих газов, %:			
O_2	15,8	16,0	15,6
CO_2	4,8	4,8	4,9
CO	2904	2904	2904
NO_x	137	138	138
SO_2	701	766	784
Температура уходящих газов t_{yx} , °С	96	96	96
Коэффициент избытка воздуха α	4,77	4,03	4,46
Потери теплоты с уходящими газами q_2 , %	15,0	13,2	14,0
Потери теплоты из-за химического недожога q_3 , %	4,3	3,9	4,1
Коэффициент использования топлива, %	80,7	82,0	81,8
КПД котла, %	79,7	81,0	80,8

Таблица 3

Обобщенные результаты испытаний	Интенсивный режим	Экономичный режим	Минимальный режим
Мощность котла, кВт	115	50	8,8
Температура сетевой воды, °С:			
обратной	70	70	70
прямой	75	72,5	71,5
Расход топлива, кг/ч:			
дрова 50 %-ной влажности ($Q_H^p = 7806$ кДж/кг)	57	23	4
дрова 35 %-ной влажности ($Q_H^p = 11\,490$ кДж/кг)	45,6	21	3,7
дрова 20 %-ной влажности ($Q_H^p = 14\,170$ кДж/кг)	35,1	13	2,3
торф кусковой ($Q_H^p = 17\,600$ кДж/кг)	29,8	12,3	2,0
КПД котла, %	79	83	88,3

Коэффициент полезного действия вычисляли из расчетных показателей коэффициента использования топлива, определенных газоанализатором, с учетом потерь теплоты через теплоизоляцию котла. Потери теплоты в окружающую среду q_5 принимали равными 2 %. В табл. 1 – 3 представлены протоколы испытаний водогрейного котла при сжигании различных видов топлива. Значения полезной N_p и средней N_{cp} мощностей котла за период испытаний получены путем расчетов по формулам (5) и (6).

Выводы

1. Испытываемый водогрейный котел обеспечивает производство тепловой энергии с выходной мощностью от 8 до 120 кВт.

2. КПД котла определен в пределах от 75 до 83 % (при возрастании мощности КПД снижается).

3. Котел легко регулируется, обеспечивая горение во всем диапазоне мощности.

4. Наиболее стабильная работа котла была выявлена при сжигании торфа в брикетах.

5. Наименее предпочтительна работа котла на фрезерном торфе (выходная мощность — до 30 кВт).

6. При сжигании дров с влажностью до 50 % выходная мощность котла составляет от 6 до 140 кВт.

7. Работа котла в экономичном режиме достигается при средних тепловых потерях в здании в отопительный период 40 – 60 кВт.

kvml@ya.ru