

Повышение эффективности котла БКЗ-420-140 НГМ путем охлаждения газов ниже температуры точки росы

Зиганшина С. К., канд. техн. наук, Кудинов А. А., доктор техн. наук
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Выполнен тепловой расчет конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа, установленного за котлом БКЗ-420-140 НГМ, и определена его экономическая эффективность. Результаты расчетов обобщены для котлов разной тепловой мощности.

Ключевые слова: температура точки росы, конденсационный теплоутилизатор, продукты сгорания топлива, котел, конденсат водяных паров, теплопроизводительность, экономическая эффективность.

Одним из путей улучшения использования топлива в котельных установках является охлаждение уходящих продуктов сгорания ниже температуры точки росы в конденсационных теплоутилизаторах (КТ) контактного или поверхностного типа. Особенно эффективно применение КТ при утилизации теплоты продуктов сгорания природного газа, что объясняется высоким качеством выделяющегося из них конденсата водяных паров, который после дегазации может использоваться в качестве подпиточной воды тепловых сетей или питательной воды котлов. В КТ наряду с охлаждением продуктов сгорания и получением конденсата водяных паров происходит снижение содержания в уходящих газах оксидов азота [1, 2].

На Самарской ТЭЦ ОАО «Волжская ТГК» находятся в эксплуатации пять энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ, за каждым из которых установлено по два вращающихся регенеративных воздухоподогревателя типа РВП-54. Котлы работают под наддувом. Основным топливом является природный газ. Предлагается за котлом БКЗ-420-140 НГМ установить конденсационный теплоутилизатор поверхностного типа для нагрева исходной воды перед подачей ее на химводоочистку и получения конденсата водяных паров из уходящих газов. Конденсат водяных паров из газов, полученный в КТ поверхностного типа, после дегазации целесообразно использовать в качестве подпиточной воды теплосети.

Тепловой расчет КТ поверхностного типа выполнен по методике, изложенной в [1]. Цель расчета — определение теплопроизводительности КТ по заданным значениям параметров дымовых газов на входе в теплоутилизатор и на выходе из него, количества подогреваемой воды, расхода конденсата водяных паров, выделяющегося из продуктов сгорания при их охлаждении ниже темпера-

туры точки росы, и поверхности теплообмена КТ, а также оценка повышения коэффициента использования топлива котла за счет установки КТ.

В качестве теплообменного элемента КТ была выбрана биметаллическая трубка калорифера типа КСк, внутренний слой которой — стальной, а наружный — алюминиевый с накатанным оребрением. Рабочая трубка калорифера КСк-4-11 имеет следующие геометрические параметры (рис. 1): $d_B^H \times S = 16 \times 1,2$ мм; $d_B = 0,0136$ м; $d_H = 0,018$ м; $d_{op} = 0,039$ м; $h_p = 0,0105$ м; $\delta_1 = 0,0012$ м; $\delta_2 = 0,001$ м; $S_p = 0,0028$ м; $\delta_p = 0,00055$ м; $F_2/F_1 = 15$ (коэффициент оребрения, равный отношению наружной оребренной поверхности к внутренней гладкой поверхности); $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 205$ Вт/(м·К) — теплопроводности внутренней и наружной трубок.

Исходные данные для расчета: состав газообразного топлива Уренгойского месторождения; расход топлива на котел $B = 9,0271$ м³/с; паропроизводительность котла $D_{пе} = 420$ т/ч; температура уходящих газов на входе в КТ $t'_{yx} = 120$ °С, на выходе из КТ $t''_{yx} = 40$ °С; коэффициент избытка воздуха в уходящих газах за РВП (перед КТ) $\alpha_{yx} = 1,3$; температура воды на входе в КТ $t'_B = 5$ °С, на выходе из него $t''_B = 35$ °С; низшая теплота сгорания топлива $Q_H^c = 33,383$ МДж/м³, высшая — $Q_B^c = 37,126$ МДж/м³; скорость газов через КТ $v_{yx} = 5$ м/с; скорость воды в рабочих трубках КТ $v_B = 2,5$ м/с; доля перепускаемых по байпасу газов $\delta = 0,5$ (байпасным является второй газодход после котла).

Объем влажных продуктов сгорания газообразного топлива Уренгойского месторождения $V_r = 13,5668$ м³/м³ газа. Расход уходящих газов на выходе из котельной установки

$$V_{yx}^{кот} = 3600 \cdot 9,0271 \cdot 13,5668 = 440887,9 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

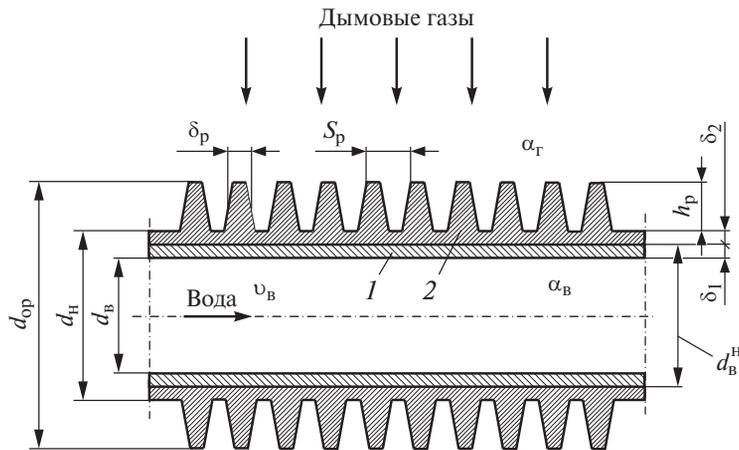


Рис. 1. Схема биметаллической трубки калорифера КСк:

1 — внутренняя стальная трубка; 2 — наружная алюминиевая трубка с накатанным оребрением

Отсюда расход уходящих газов через теплоутилизатор

$$V_{yx} = (1-\delta)V_{yx}^{КОТ} = 0,5 \cdot 440887,9 = 220443,95 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Теплопроизводительность КТ $Q_{КТ}$, ккал/ч, определяли по формуле [3]

$$Q_{КТ} = V_{yx} \left[0,33(t'_{yx} - t''_{yx}) + 435 \frac{x'_{yx} - x''_{yx}}{0,6 + x'_{yx}} \right], \quad (1)$$

где $x'_{yx} = 0,11514$ и $x''_{yx} = 0,04651$ — влагосодержание уходящих газов соответственно на входе в теплоутилизатор и на выходе из него, кг/кг сухих газов.

Теплопроизводительность КТ $Q_{КТ} = 15022102,74$ ккал/ч (17,471 МВт).

Повышение коэффициента использования топлива котла за счет установки КТ

$$\Delta \eta_k = \frac{Q_{КТ}}{BQ_B^c} \cdot 100 = \frac{15022102,74 \cdot 100}{32498 \cdot 8867} = 5,2 \text{ \%}.$$

По методике [1] определены температура, влагосодержание и температура точки росы уходящих газов на выходе из котельной установки для случая, когда установлен КТ: $t_{yx} = 80,4$ °С, $x_{yx} = 0,08083$ кг/кг и $t_{p,yx} = 48,9$ °С. При этом температура точки росы газов на входе в КТ $t'_{p,yx} = 54,6$ °С.

Расход нагреваемой в КТ воды

$$G_B = \frac{\eta_{КТ} Q_{КТ}}{c_B (t''_B - t'_B)} = \frac{0,98 \cdot 15022102,74}{35 - 5} = 490722,02 \text{ кг/ч},$$

где $\eta_{КТ} = 0,98$ — КПД теплоутилизатора; $c_B = 4,187$ кДж/(кг · К) или 1 ккал/(кг · °С) — теплоемкость воды.

Расход конденсата водяных паров, выделяющегося в КТ из продуктов сгорания при их охлаждении ниже температуры точки росы, $G_k = 15,626$ т/ч (при $B = 9,0271$ м³/с).

Площадь поверхности теплообмена теплоутилизатора $F_{КТ}$ определяется из уравнения теплопередачи

$$F_{КТ} = \frac{Q_{КТ}}{k_{КТ} \Delta t_{ср}}, \quad (2)$$

где $k_{КТ}$ — поверхностный коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К); $\Delta t_{ср} = 56,35$ °С — средний температурный напор.

Коэффициент теплопередачи

$$k_{КТ} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_{г}} + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_{c,ti}}{\lambda_{c,ti}} + \frac{1}{\alpha_{в}} \right), \quad (3)$$

где $\alpha_{г}$ — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности теплообменника, Вт/(м² · К); $\delta_{c,ti}$ и $\lambda_{c,ti}$ — толщина, м, и теплопроводность материала, Вт/(м · К), i -го слоя трубы; $i = 1, 2, \dots, m$ — число слоев, составляющих трубу; $\alpha_{в}$ — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к нагреваемой воде, Вт/(м² · К).

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{в} = \frac{Nu_B \lambda_B}{d_B} = \frac{203,821 \cdot 59,9 \cdot 10^{-2}}{0,0136} = 8977,12 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где Nu_B — число Нуссельта для потока воды; λ_B — теплопроводность воды, Вт/(м · К), определяемая при средней температуре воды $t'_{ср} = 0,5(t'_B + t''_B)$ [4]; d_B — внутренний диаметр внутренней трубы, м (см. рис. 1).

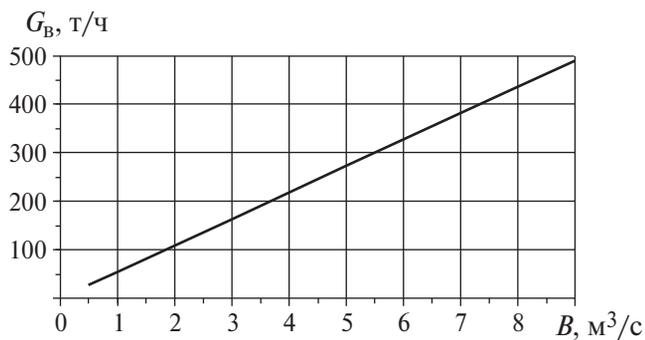


Рис. 2. Зависимость расхода воды, подогреваемой в КТ, от расхода топлива на котел при $\delta = 0,5$

Число Нуссельта Nu_B для потока воды рассчитывали по критериальному уравнению [5].

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_r = \frac{Nu_r \lambda_r}{d_H},$$

где λ_r — теплопроводность продуктов сгорания, Вт/(м·К), определяемая при средней температуре газов $t_r^{cp} = 0,5(t'_{yx} + t''_{yx})$ [4]; d_H — наружный диаметр наружной трубы, м (см. рис. 1).

Число Нуссельта для потока газов рассчитывали по формуле [1]

$$Nu_r = 4,55 Re_r^{0,315} K^{0,388} Pr_r^{2/3}, \quad (4)$$

где Re_r — критерий Рейнольдса для потока газов; K — критерий орошения наружной поверхности трубы конденсатом водяных паров из газов; Pr_r — критерий Прандтля для газов.

Критерий Рейнольдса Re_r определяется по формуле

$$Re_r = \frac{v_r d_H}{\nu_r}, \quad (5)$$

где v_r — скорость газов, м/с; ν_r — кинематический коэффициент вязкости продуктов сгорания, м²/с; ν_r и Pr_r рассчитываются при средней температуре газов [4].

Критерий орошения K вычисляется по формуле

$$K = \frac{W d_H}{\mu}, \quad (6)$$

где $W = G_k / F_{KT}$ — плотность орошения наружной поверхности теплообменника конденсатом водяных паров из газов, кг/(с·м²); μ — динамический коэффициент вязкости продуктов сгорания, Па·с (определяется при средней температуре газов [4]); G_k — расход кон-

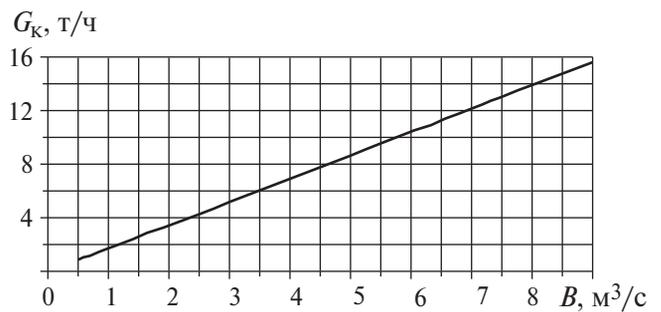


Рис. 3. Зависимость расхода конденсата водяных паров, получаемого из газов в КТ, от расхода топлива на котел при $\delta = 0,5$

денсата водяных паров, выделяющегося из продуктов сгорания при их охлаждении ниже температуры точки росы, кг/с.

Так как на этом этапе расчетов F_{KT} является неизвестной величиной, далее расчет поверхности теплообмена выполняли методом последовательных приближений.

Расчетная площадь поверхности теплообмена КТ, установленного за котлом БКЗ-420-140 НГМ, равна 3600 м² при доле перепускаемых по байпасу газов $\delta = 0,5$. При этом коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности конденсационного теплообменника $\alpha_r = 87,2$ Вт/(м²·К), а коэффициент теплопередачи $k_{KT} = 86,15$ Вт/(м²·К).

Основой для расчетов послужили результаты обследований энергокотлов БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ и натурных испытаний КТ поверхностного типа, смонтированного в газоходе за паровым котлом ДЕ-10-14 ГМ (ст. № 2) Ульяновской ТЭЦ-3 [1, 2]. Расчет экономической эффективности установки КТ за паровым котлом БКЗ-420-140 НГМ выполнен по методике [1]. При определении экономической эффективности учитывали экономию тепловой энергии и химически очищенной воды (конденсата водяных паров из продуктов сгорания).

Количество теплоты при использовании конденсата водяных паров из дымовых газов в системе теплоснабжения ТЭЦ

$$Q_k = 15626 \cdot (40 - 5) \cdot 4,187 \cdot 0,278 \cdot 10^{-6} = 0,637 \text{ МВт.}$$

Суммарное количество утилизируемой теплоты

$$Q_c = Q_{KT} + Q_k = 17,471 + 0,637 = 18,108 \text{ МВт.}$$

Результаты расчетов экономической эффективности за счет установки КТ (при $\delta = 0,5$) обобщены для котлов разной тепловой мощности и представлены на рис. 2–5 и в таблице.

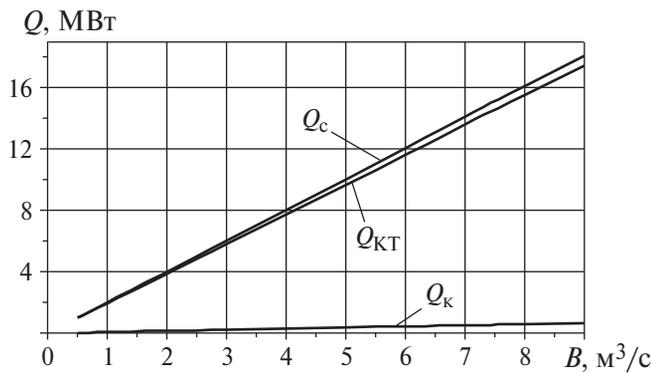


Рис. 4. Зависимости Q_k , $Q_{КТ}$ и Q_c от расхода топлива на котел при $\delta = 0,5$

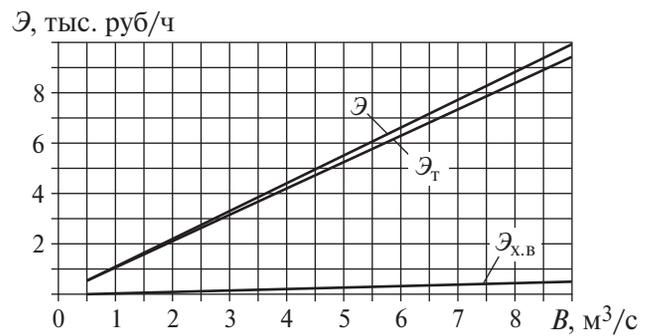


Рис. 5. Зависимости стоимостей экономленной химочищенной воды и тепловой энергии, а также экономической эффективности за счет установки КТ от расхода топлива на котел при $\delta = 0,5$

$B, \text{М}^3/\text{с}$	$Q_{КТ}, \text{МВт}$	$G_B, \text{т/ч}$	$G_K, \text{т/ч}$	$Q_k, \text{МВт}$	$Q_c, \text{МВт}$	$\mathcal{E}_T, \text{тыс. руб/ч}$	$\mathcal{E}_{х.в.}, \text{тыс. руб/ч}$	$\mathcal{E}, \text{тыс. руб/ч}$
0,5	0,96769	27,181	0,864	0,0352	1,00289	0,52491	0,02765	0,55256
1	1,93539	54,362	1,728	0,0704	2,00579	1,04982	0,0553	1,10512
3	5,80617	163,085	5,184	0,21119	6,01736	3,14946	0,16589	3,31535
5	9,67695	271,809	8,64	0,35199	10,0289	5,24911	0,27648	5,52559
7	13,54773	380,532	12,132	0,49425	14,042	7,34952	0,38822	7,73774
8	15,48312	434,894	13,86	0,56465	16,0478	8,39934	0,44352	8,84286
9	17,4185	489,256	15,588	0,63505	18,0536	9,44916	0,49882	9,94798

Стоимость экономленной тепловой энергии

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_T &= Q_c e_T = \\ &= 18,108 \cdot 608,71/1,163 = 9477,7 \text{ руб/ч}, \end{aligned}$$

где $e_T = 608,71$ руб/Гкал — себестоимость теплоты в ценах на январь 2013 г.

Стоимость экономленной химически очищенной воды

$$\mathcal{E}_{х.в.} = G_K e_{х.в.} = 15,626 \cdot 32 = 500,032 \text{ руб/ч},$$

где $e_{х.в.} = 32$ руб/т — себестоимость химически очищенной воды в ценах на январь 2013 г.

Экономическая эффективность за счет установки КТ при числе часов работы котла БКЗ-420-140 НГМ 5000 ч/год

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{год}} &= (9477,7 + 500,032) \cdot 5000 \cdot 10^{-6} = \\ &= 50 \text{ млн руб/год}. \end{aligned}$$

Отметим, что срок окупаемости внедрения КТ поверхностного типа за котлом БКЗ-420-140 НГМ на Самарской ТЭЦ составляет менее 1 года.

Таким образом, установка конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа за котлом БКЗ-420-140 НГМ для нагрева исходной воды перед подачей ее на химводоочистку и получения конденсата водяных паров из уходящих газов энергокотла обеспечила экономическую эффективность в размере 50 млн руб/год при работе котла 5000 ч/год. Результаты теплового расчета КТ обобщены для котлов разной тепловой мощности.

Список литературы

1. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. — М.: Машиностроение, 2011.
2. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Охлаждение продуктов сгорания природного газа в конденсационных теплоутилизаторах. — Промышленная энергетика, 2010, № 4.
3. Аронов И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. — Л.: Недра, 1990.
4. Кудинов А. А. Тепломассообмен. — М.: ИНФРА-М, 2012.
5. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977.