

Эффективность применения теплоутилизатора тепла дымовых газов на котельных малой мощности

А.Ю. Ефимов, А.А. Фролов

*ФГБОУ ВО Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,
Саранск*

Аннотация: В статье рассмотрены несколько способов утилизации тепла уходящих газов котлоагрегата, такие как использование в технологической схеме котельной тепловой насос, второй способ использование в технологической схеме центробежный осушитель расположенный в системе дымоудаления, который также является дымосос и самый распространенный это глубокое охлаждение (ниже точки росы) продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах. Глубокое охлаждение дымовых газов в специальных конденсационных теплообменных аппаратах (утилизаторах) позволяет не только организовать полное использование физической теплота дымовых газов (низшей теплоты сгорания топлива), но и осуществить отбор скрытой теплота конденсации водяных паров. Коэффициент использования котлоагрегата будет повышен на 10-12% в оптимальном режиме. В результате установки теплоутилизатора снижается содержание оксидов азота в дымовых газах, также этого можно добиться и с помощью применения теплонасосных установок. Эффективность реализации проектов по установке конденсационных утилизаторов в большой степени зависит от количества часов их работы на максимальной мощности в режиме глубокой утилизации. В связи с чем предложен вариант оптимизации тепловой схемы котельной с утилизатором тепла дымовых газов.

В данной статье предложен расчет, а также проведена технико-экономическая оценка внедрения теплообменника уходящих газов на байпасе дымохода действующей блочно-модульной котельной расположенной в г. Спасск мощностью 0,2 Гкал/ч.

Ключевые слова: котельная, конденсационный теплообменник, уходящие газы, теплоноситель, система теплоснабжения, теплоутилизатор, тепловая схема котельной, оптимизация, котлоагрегат, дымовые газы, теплогенерирующая установка, конденсация, теплообменник, теплонасосная установка, охлажденные газы.

При проведении технологического аудита на котельных малой мощности Республики Мордовия было выявлено, что даже новые блочно-модульные газифицированные котельные имеют сравнительно не высокие технико-экономические показатели, а именно К.П.Д. котла. Одним из факторов влияющих на К.П.Д. является температура уходящих газов.

Повышение КПД котла за счет снижения температуры уходящих газов, является актуальным и эффективным. Существует несколько основных способов осушки дымовых газов: первый это использование в

технологической схеме тепловой насос [1]; второй способ использование в технологической схеме центробежный осушитель [2,3]. Анализ литературных источников информации, а также опыт эксплуатации показал, что одним из путей существенного повышения коэффициента использования топлива (к.и.т.) является глубокое охлаждение (ниже точки росы) продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах [4-7].

Докажем теоретические возможности снижения температуры уходящих газов ниже указанных выше значений, не приводящих к появлению конденсата на стенках газоотводящего такта. Для предупреждения конденсации водяных паров в газоходах и дымовой трубе в технологической схеме предлагается установка на байпассе дымохода конденсационного теплообменника [8]. Определим теоретически необходимый объем воздуха для сжигания 1 м^3 природного газа.

По формуле находим:

Найдем объем уходящих газов, образующихся при сгорании 1 м^3 природного газа, того же состава при $\alpha = 1,19$.

$$V_{RO_2}^s = 0,01 \cdot (95,7 + 2 \cdot 1,9 + 3 \cdot 0,5 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1) = 1,027 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot 9,7 + 0,01 \cdot 1,3 = 7,7 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (2 \cdot 95,7 + 3 \cdot 1,9 + 4 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,1 + 0,124 \cdot 10) + 0,0161 \cdot 9,7 = 2,18 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_2^{yx} = 1,027 + 7,7 + 2,18 + 1,0161 \cdot (1,19 - 1) \cdot 9,7 = 12,8 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов сгорания (уходящих газов в топке) определяется:

$$V_{\text{тг}} = V_{\text{г}}^{yx} \cdot B, \quad (1)$$

где B – расход топлива, кг/ч; $V_{\text{г}}^{yx}$ – объем уходящих газов, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$V_{\text{тг}} = 12,8 \cdot 120,5 = 1542,4 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,43 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Найдем объем воздуха необходимый для горения, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V^B = V^0 \cdot B \cdot \alpha_6 \cdot \frac{273 + t_{XB}}{273} \cdot \frac{101,3 \cdot 10^3}{H_6}, \quad (2)$$

где H_6 – давление при нормальных условиях, $H_6 = 101324,72 \text{ Н/м}^2$;

$t_{XB} = +18 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воздуха в котельной зимой.

$$V^6 = 9,7 \cdot 120,5 \cdot 1,19 \cdot \frac{273 + 18}{273} \cdot \frac{101,3 \cdot 10^3}{101324,72} = 0,41 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Особенностью процессов глубокого охлаждения парогазовых смесей является изменение их количества вследствие конденсации части водяных паров, для расчета которого можно использовать выражение:

$$\Delta W_w^n = [W_{\text{сг}}^{\text{но}} + W_{\text{св}}^{\text{но}} \cdot (\alpha_{yx} - 1)] \cdot (d'_y - d''_y) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где ΔW_w^n – приведенное количество получаемого из продуктов сгорания конденсата; $W_{\text{св}}^{\text{но}}$ – приведенный теоретический расход сухого дутьевого воздуха, $W_{\text{св}}^{\text{но}} = 1,415$; $W_{\text{сг}}^{\text{но}}$ – приведенное теоретическое количества сухих продуктов сгорания, $W_{\text{сг}}^{\text{но}} = 1,333$; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха продуктов сгорания в газоходе перед КТ; d'_y – влагосодержание продуктов сгорания (перед теплоутилизатором), г/кг сухого газа; d''_y – влагосодержание насыщенных продуктов сгорания (на выходе из теплоутилизатора), г/кг сухого газа.

Приведенные характеристики рассчитаны по отношению к низшей теплоте сгорания топлива $Q_{\text{н}}^c$, ккал/м³. Значения d'_y и d''_y могут быть рассчитаны по приближенным формулам Л.Г.Семенюка:

$$d'_y = \frac{(0,13 + d_0 \cdot \alpha_{yx})}{(\alpha_{yx} - 0,058)}, \quad (4)$$

$$d''_y = \frac{0,0006382 + 0,004 \cdot \alpha_{yx}}{0,199 + \alpha_{yx}} \cdot e^{0,062 \cdot t''_{yx}} \quad (5)$$

где d_0 – влагосодержание дутьевого воздуха, г/кг сухого газа; t''_{yx} – температура уходящих продуктов сгорания на выходе из теплоутилизатора, °С.

По величине ΔW_w^n рассчитывается абсолютное количество конденсата ΔW_w , которое может быть получено при охлаждении продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м^3 природного газа.

Чтобы определить влагосодержание дутьевого воздуха, воспользуемся диаграммой Рамзина (рисунок 1), для этого используем 2 известных параметра: $\phi=75\%$ и $t=14,4^\circ\text{С}$.

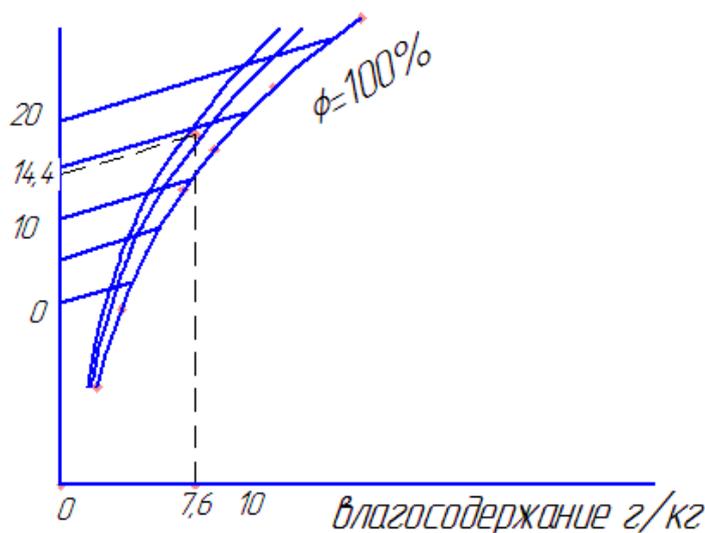


Рис.1. – Влагосодержание дутьевого воздуха на i-d диаграмме

$d_0 = 7,6$ г/кг сухого воздуха, получаем, что:

$$d'_y = \frac{(0,13 + 0,0076 \cdot 1,19)}{(1,19 - 0,058)} = 0,123 \text{ кг/кг сухого газа,}$$

$$d''_y = \frac{0,0006382 + 0,004 \cdot 1,19}{0,199 + 1,19} \cdot e^{0,062 \cdot 50} = 0,086 \text{ кг/кг сухого газа.}$$

При $d'_y = 123$ г/кг, по диаграмме Рамзина рисунок 2 находим температуру точки росы, которая равна $t'_y = 10,3^\circ\text{С}$.

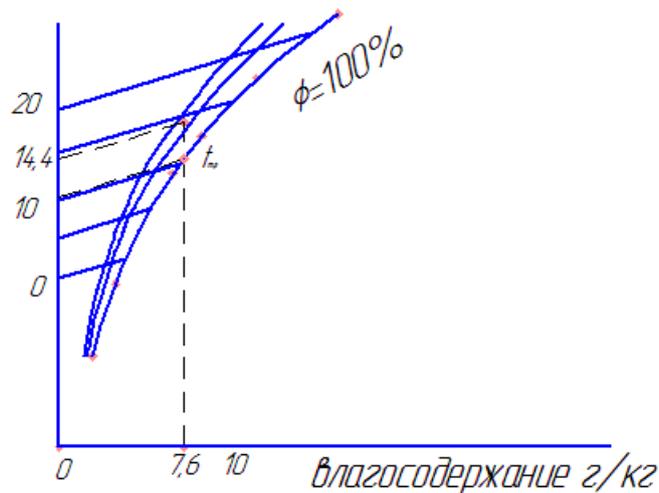


Рис. 2. – Температура точки росы

Определим приведенное количество конденсата:

$$\Delta W_w^n = [1,333 + 1,415 \cdot (1,19 - 1)] \cdot (123 - 86) \cdot 10^{-3} = 0,059$$

В этом случае при сжигании 1 м^3 природного газа с теплотой сгорания $Q_H^c = 8000 \text{ ккал/м}^3$ выделяется абсолютное количество конденсата

$$\Delta W_w = \frac{0,059 \cdot 8000}{1000} = 0,472 \text{ кг.}$$

Массовая доля дымовых газов, поступающих в теплоутилизатор, определяется по формуле смешения:

$$g_n = \frac{t_{yz} - t_g}{t_{yz} - t'} \quad (6)$$

где t_{yz} - температура уходящих газов; t_g - теоретическая температура смеси газов после байпасирования (принимается $\approx 70^\circ\text{C}$); t' - температура точки росы уходящих газов на выходе из утилизатора.

$$g_n = \frac{168,1 - 70}{168,1 - 49,9} = 0,83 (83\%).$$

Определяем долю уходящих газов, проходящих через теплообменник.

$$G_{ym} = V_{yx} \cdot g_n = 0,43 \cdot 0,83 = 0,357 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

Влагосодержание дымовых газов, поступающих в дымосос или дымовую трубу, определяется по формуле смешения байпасируемого и проходящего через утилизатор потоков газов:

$$d_g = g_n \cdot d'' + (1 - g_n) \cdot d', \quad (7)$$

где d' - влагосодержание дымовых газов на входе в утилизатор; d'' - влагосодержание дымовых газов на выходе из утилизатора.

$$d_g = 0,83 \cdot 0,086 + (1 - 0,83) \cdot 0,123 = 0,092 \text{ кг/кг.}$$

Определяем расчетную температуру газов после смешения, она выражается из равенства:

$$(t_{cm} - t'') \cdot G_{ym} = (t_{yx} - t_{cm}) \cdot G_{\bar{o}} \quad (8)$$

где $G_{\bar{o}}$ - расход газа проходящего через байпас; G_{yx} - расход газа проходящего через утилизатор.

$$t_{cm} = \frac{G_{ym} \cdot t'' + G_{\bar{o}} \cdot t_{yx}}{G_{ym} + G_{\bar{o}}} = \frac{0,357 \cdot 49,9 + 0,073 \cdot 168,1}{0,357 + 0,073} = 69,9 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

На рисунке 3 показаны все процессы, происходящие с дымовыми газами при байпасировании.

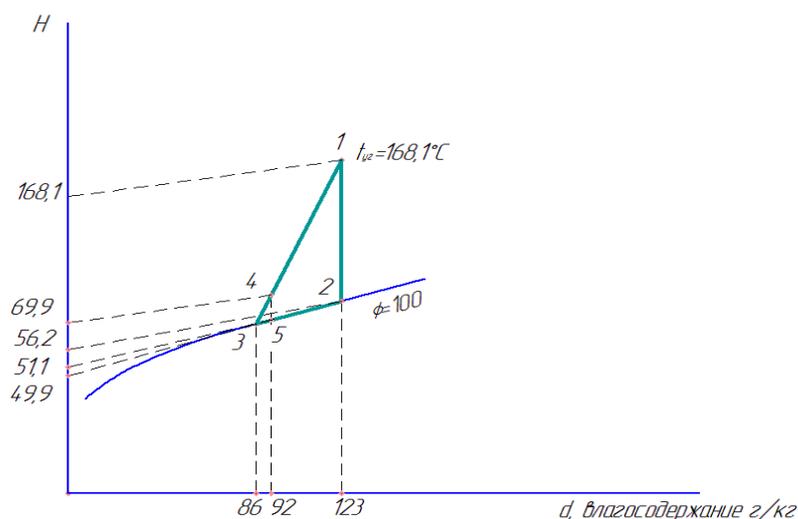


Рис.3. – i-d диаграмма

Определяем температуру нагреваемой среды (вода) на выходе из теплообменника, °С, берем в расчет, что фактическая подпитка сетевой воды составляет $0,2 - 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$:

$$t''_e = \frac{G'_{y2} \cdot C'_{y2} \cdot (t'_{y2} - t''_{y2})}{G_e \cdot C_e} + t'_e, \quad (9)$$

где C'_{y2} и C_e – средние теплоемкости греющей и нагреваемой среды; G'_{y2} и G_e – массовые расходы греющей и нагреваемой среды ($0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$); t'_{y2} и t''_{y2} – температура уходящих газов на входе и на выходе теплообменника; t'_e – температура нагреваемой воды на входе в теплообменник.

$$t''_e = \frac{0,357 \cdot 1,001 \cdot (168,1 - 49,9)}{0,3 \cdot 4,2} + 8 = 41,5 \text{ °С}.$$

В результате расчетов необходимо изготовить теплообменник со следующими основными характеристиками, которые приведены в таблице №1.

Таблица №1

Характеристики теплообменника

Диаметр кожуха D, мм	Общее число труб, шт	Количество ходов по трубам	Площадь поверхности теплообмена, м ²	Длина труб, мм	Площадь сечения одного хода по трубам, м ² · 10 ²	Площадь проходного сечения, м ² · 10 ²	
						В вырезе перегородки и	Между перегородками
400	111	1	26	3000	3,8	2,0	3,1

В результате установки теплотутилизатора на котельной мощностью $0,2 \text{ Гкал/ч}$ были получены следующие технико-экономические показатели:

Амортизационные отчисления

$$A_o = 2428132,5 \cdot 0,083 = 201535 \text{ руб.}$$

Затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание

$$T_{po} = 0,0638 \cdot 2428132,5 = 154914,8 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию, руб:

$$Z_{эл} = 6,03 \cdot 324115,22 = 1954414,8$$

Стоимость топлива (газа) C_m , руб:

$$C_m = Q_{год} \cdot b_p \cdot C_p, \quad (10)$$

где $Q_{год2}$ – количество тепловой энергии, потребляемой за год на отопление, с учетом утилизатора, Гкал/ч; b_p – удельный расход газа котлом, м³/кВт·ч; C_p – стоимость 1 м³ газа, руб.

$$Q_{год2} = Q_{год} - Q_{год.ум.} = 3676,3 - 194,4 = 3481,9 \text{ Гкал/ч.}$$

$$C_m = 3481,9 \cdot 154,6 \cdot 5 = 2691508,7 \text{ руб.}$$

Общие эксплуатационные затраты:

$$Э_3 = 201535 + 154914,8 + 224728 + 2691508,7 + 1954414,8 = 5227101,3 \text{ руб.}$$

Проектная себестоимость производства тепловой энергии с учетом НДС, руб./кВт·ч составила

$$C_{мэ} = \frac{5227101,3}{3481,9} \cdot 1,18 = 1771,4 \text{ руб./кВт·ч;}$$

Годовой экономический эффект:

$$П_{эф} = (2105,6 - 1771,4) \cdot 3481,9 = 1163651 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений, лет:

$$T_k = \frac{2428132,5}{1163651} = 2,1.$$

В результате установки теплоутилизатора в котельной мощностью 0,2 Гкал/ч, произошло снижение удельного расхода топлива до 154,6 кг.у.т/Гкал, при этом срок окупаемости составил 2,1 года.

Литература

1. Руденко Н.Н. Особенности прогнозирования эффективности работы теплового насоса // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть1). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/.

2. Левцев А.П., Артемов И.Н., Ениватов А.В. Патент на полезную модель RUS 45712 11.01.2005 Осушитель воздуха.

3. Левцев А.П., Ениватов А.В. Повышение эффективности использования теплонасосных установок // Республиканская научно-практическая конференция «Роль науки и инноваций в развитии хозяйственного комплекса республики Мордовия» Саранск: 2001. С. 222-223.

4. Артемов И.Н., Ениватов А.В., Артемова Е.А., Лазарев А.А., Лазарев В.А. Эффективность применения в котельных устройства утилизации теплоты уходящих газов на примере котельной № 3 г. Спасска Пензенской области. Международная научно-техническая конференция. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» Саранск, 2016. С. 164-167.

5. Артемов И.Н., Артемова Е.А. Наиболее полное использование теплоты уходящих газов котлоагрегатов. Международная научно-техническая конференция. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» 2014. С. 126-129.

6. Беспалов, В.В., Беспалов В.И. Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 4: Энергетика. – С.56–59.

7. Беспалов, В.В. Технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов // Энергетика Татарстана. – 2015. – №2(38). – С.32–36.

8. Ениватов А.В., Артемов И.Н., Савонин И.А. Оптимизация тепловой схемы котельной с утилизатором тепла дымовых газов // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4746.

9. Bupalov, V.V., Belyaev L.A., Kuchman L.S. Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 91. pp. 103-107.

10. Bupalov, V.V., Bupalov V.I., Melnikov D.V. Experimental study of heat transfer from the gas-vapor mixture to the surface in rectangular channel with the water vapor condensation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – №754. pp. 42-46.

References

1. Rudenko N.N. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (part 1) URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/.

2. Levcev A.P., Artemov I.N., Enivatov A.V. Patent na poleznuyu model' RUS 45712 11.01.2005 Osushitel' vozduha [Patent for utility model RUS 45712 11.01.2005 Air dehumidifier].

3. Levcev A.P., Enivatov A.V. Povyshenie ehffektivnosti ispol'zovaniya teplonasosnyh ustanovok. Respublikanskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Rol' nauki i innovacij v razvitii hozyajstvennogo kompleksa respubliki Mordoviya» Saransk. 2001. pp. 222-223.

4. Artemov I.N., Enivatov A.V., Artemova E.A., Lazarev A.A., Lazarev V.A. EHffektivnost' primeneniya v kotel'nyh ustrojstva utilizacii teploty uhodyashchih gazov na primere kotel'noj № 3 g. Spasska Penzenskoj oblasti. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. «EHnergoehffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy» Saransk, 2016. pp. 164-167.

5. Artemov I.N., Artemova E.A. Naibolee polnoe ispol'zovanie teploty uhodyashchih gazov kotloagregatov. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. «Ehnergoehffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy» 2014. pp. 126-129.



6. Bespalov, V.V. Izvestiya TPU. 2010. T. 316, № 4: EHnergetika. pp.56–59.
7. Bespalov, V.V. Energetika Tatarstana. 2015. №2 (38). pp.32–36.
8. Enivatov A.V., Artemov I.N., Savonin I.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus) 2018, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4746.
9. Bespalov, V.V., Belyaev L.A., Kuchman L.S. 2017. № 91. pp. 103-107.
10. Bespalov, V.V., Bespalov V.I., Melnikov D.V. 2016. №754. pp. 42-46.