

Повышение долговечности газоотводящих трактов котельных установок при применении современных теплоутилизационных технологий

Фиалко Н.М.¹, Прокопов В.Г.², Навродская Р.А.², Степанова А.И.², Пресич Г.А.², Шевчук С.И.², Глушак О.Ю.²

¹ *Национальный технический университет «КПИ», Киев*

² *Институт технической теплофизики НАНУ, Киев*

Проведен анализ эксплуатации газоотводящих трактов котельных установок коммунальной теплоэнергетики Украины. Исследовано влияние режимов работы котельных агрегатов и конструктивных особенностей газоходов и дымовых труб на процессы конденсатообразования в этих каналах. Определены основные пути повышения надежности и долговечности газоотводящих трактов, включая дымовые трубы. Рассмотрены общие аспекты применения тепловых методов предотвращения конденсатообразования в газоотводящих трактах с целью их защиты от коррозионного разрушения. Показано, что применение глубокого охлаждения и осушения дымовых газов способствует повышению долговечности газоотводящего тракта котельных установок.

Ключевые слова: котельные установки, газоотводящие тракты, осушение газов, предотвращение конденсатообразования.

Проведено аналіз експлуатації газівідвідних трактів котельних установок комунальної теплоенергетики України. Досліджено вплив режимів роботи котельних агрегатів та конструктивних особливостей газоходів та димових труб на процеси конденсатоутворення у газівідвідних трактах. Визначено основні шляхи підвищення надійності й довговічності газівідвідних трактів, у тому числі димових труб. Розглянуто загальні аспекти застосування теплових методів запобігання конденсатоутворенню у газівідвідних трактах з метою його захисту від корозійного руйнування. Показано, що використання глибокого охолодження та осушення димових газів сприяє підвищенню довговічності газівідвідного тракту котельних установок.

Ключові слова: котельні установки, газівідвідні тракты, осушування газів, запобігання конденсатоутворенню.

Актуальность проблемы рационального расходования топлива неуклонно возрастает, особенно природного газа как наиболее ценного вида топлива. Одним из рациональных путей решения проблемы повышения коэффициента использования теплоты топлива (КИТ) есть создание технологических, энергетических, отопительных агрегатов с высоким КПД, отвечающих современным требованиям максимального использования высшей теплоты сгорания этого топлива. Максимальное использование теплоты топлива в газопотребляющих энергоустановках возможно лишь при охлаждении дымовых газов ниже температуры точки росы и утилизации не только их физической (так называемой явной) теплоты, но и теплоты конденсации содержащегося в них водяного пара.

Такое глубокое охлаждение продуктов сгорания топлива осуществляется при применении современных теплоутилизационных технологий,

когда температура отходящих газов для котельных агрегатов, как правило, опускается ниже указанной точки росы (которая составляет при сжигании природного газа 50–60 °С). То есть после теплоутилизационного оборудования температура дымовых газов, поступающих в газоотводящие тракты котельных установок, может соответствовать температуре насыщения. При таких условиях в отводящих газоходах и дымовой трубе при низких температурах окружающей среды обычно происходит конденсация остатков водяного пара, содержащегося в отходящих газах.

Анализ эксплуатации котельных установок малой и средней мощности показал, что в современных условиях значительное количество котлов работает при сниженных тепловых нагрузках и в некоторых режимах их работы наблюдается увлажнение внутренней поверхности дымовой трубы за счет глубокого охлаждения

отходящих газов. То есть конденсатообразование в газоотводящих трактах наблюдается часто и без применения теплоутилизации. Нельзя считать приемлемым режим работы установки, который обеспечивает охлаждение газов лишь до 60–80 °С, хотя при этом и достигается повышение КИТ на 3–4 %. При дальнейшем охлаждении газов в газоходах, дымососе и дымовой трубе (а такое охлаждение неминуемо, и, кроме того, возможен присос холодного воздуха) начнется конденсация водяного пара в газоотводящем тракте, вредная с точки зрения долговечности этих элементов котельной установки и надежности их работы. При этом наибольшую опасность влияния конденсата имеет внутренняя поверхность газоотводящего ствола дымовой трубы — последнего по ходу газов элемента котельной установки.

Образованный на внутренней поверхности газоотводящего канала конденсат из-за содержания в нем растворимых продуктов сгорания топлива имеет кислую реакцию. При сжигании газообразного топлива конденсат содержит растворенные оксиды углерода и азота, значение показателя водорода рН такого раствора обычно находится в пределах 4–6. При сжигании жидкого топлива в конденсате содержатся еще и оксиды серы, что приводит к снижению водородного показателя ($\text{pH} < 4$) [1, 2]. Таким образом, в связи с конденсатообразованием на внутренней поверхности отводящих газоходов возникает коррозия, которая приводит к их разрушению. Поэтому при применении современных технологий производства тепловой энергии в котельных существует проблема повышения долговечности их газоотводящих трактов.

Среди имеющихся путей решения указанной проблемы выделяется направление, связанное с тепловыми методами защиты газоотводящих каналов от конденсатообразования. Использование этих методов предусматривает создание и поддержание в соответствующей точке газоотводящего тракта необходимой температуры и относительной влажности дымовых газов, совокупность которых исключает выпадение конденсата.

В данной работе при исследовании эффективных методов тепловой защиты газоотводящих трактов газопотребляющей котельной установки рассмотрены основные аспекты тепловлажностного состояния дымовых газов в этих трактах и пути защиты их от разрушения.

Безопасный (с точки зрения предотвращения конденсатообразования) тепловлажностный режим газоотводящего тракта котельной установки должен отвечать условию:

$$t_{\text{пов}} \geq t_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{пов}}$ — температура внутренней поверхности газоотводящего канала, °С; $t_{\text{р}}$ — температура точки росы содержащегося в дымовых газах водяного пара, °С.

Температура внутренней поверхности газоотводящего тракта $t_{\text{пов}}$ зависит от многих факторов, которые в основном влияют на процесс теплообмена с окружающей средой. Температура точки росы $t_{\text{р}}$ определяется исключительно влажностью дымовых газов, и ее можно рассчитать по формуле [3]:

$$t_{\text{р}} = F(X) = 16,129 \ln [X \cdot 104 / (0,847\alpha + 3,67)], \quad (2)$$

где X — влагосодержание дымовых газов, кг/кг с. г. (сухих газов), которое зависит от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах α .

Очевидно, что для выполнения условия (1) необходимо повышать температуру внутренней поверхности газоотводящего тракта $t_{\text{пов}}$ или, как видно из (2), уменьшать влагосодержание дымовых газов и таким образом снижать температуру точки росы, то есть осушать дымовые газы.

Для предотвращения конденсатообразования посредством уменьшения температуры точки росы надлежащее охлаждение газов целесообразно обеспечивать либо в самом котле, либо в утилизационном конденсационном теплообменнике, установленном после котла [2, 4, 5]. То есть применение теплоутилизационных технологий с глубоким охлаждением дымовых газов отвечает их осушению. При этом необходимо обеспечить такое протекание процесса охлаждения, а следовательно, и осушение газов, чтобы образование и отведение конденсата в максимально возможной и экономически оправданной мере осуществлялось в пределах основного агрегата или утилизационного теплообменника. Это позволит, во-первых, использовать теплоту, которая выделяется при конденсации, во-вторых, улучшить состояние эксплуатации газоходов, дымососа и дымовой трубы, поскольку в этом случае в газоотводящий тракт поступит только остаточный водяной пар, образование конденсата из которого легче предупредить специальными средствами.

Для водогрейных котлов отопительных и промышленных котельных с целью анализа процесса осушения газов в конденсационных элементах котла или отдельно установленных теплообменниках (теплоутилизаторах) были проведены расчетные исследования относительно тепловлажностного состояния дымовых газов для разных тепловых режимов котельных установок.

С целью сокращения объема расчетных исследований и повышения надежности результатов были использованы статистические методы

планирования эксперимента и регрессионный анализ [6]. В данной работе применены статистические методы планирования эксперимента, которые позволяют получить математическую модель исследуемого объекта (уравнение регрессии) в виде полинома второго порядка. Для достижения цели был реализован ортогональный центральный композиционный план, для которого число исследуемых точек составляет 15, что разрешает сократить объем исследований примерно в 20 раз.

При этом в качестве независимых факторов служат коэффициент избытка воздуха α , относительная тепловая нагрузка котла Q_K/Q_H (Q_K , Q_H – нагрузка текущая и в номинальном режиме), температура окружающей среды (наружного воздуха $t_{нв}$), а функцией отклика избрана относительная величина K :

$$K = (X^o - X^k) / X^o, \quad (3)$$

где X^o – начальное влагосодержание газов, кг/кг с.г.; X^k – влагосодержание газов конечное (после теплоутилизатора), кг/кг с.г.

Условия проведения исследований приведены в таблице. Уровни варьирования физических переменных (факторов) определены с учетом реальных режимных характеристик котлов. Была составлена матрица планирования эксперимента в кодовых переменных и получено уравнение регрессии в физических переменных, описывающее зависимость коэффициента K от относительной тепловой нагрузки котла Q_K/Q_H , температуры окружающей среды $t_{нв}$ и коэффициента избытка воздуха α в дымовых газах.

Оценка однородности дисперсий на каждом уровне факторов проводилась по критерию Кохрена, проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии – по критерию Стьюдента, проверка адекватности полученного уравнения исходным данным – по критерию Фишера F .

На рис.1 приведены характерные результаты проведенных исследований при применении теплоутилизационного оборудования для предварительного нагрева обратной воды котла номинальной мощностью $Q_H = 2,0$ МВт.

Условия проведения исследований

Характеристика	$Q_K/Q_H, \%$	$t_{нв}, \text{°C}$	α
Основной уровень, нулевая точка x_{i0}	42	2,5	1,40
Верхний уровень $x_{iв}$	57	8,5	1,57
Нижний уровень $x_{iн}$	27	-3,5	1,23
Звездные точки $x_{iв}/x_{iн}$	60/25	10/-5	1,60/1,20
Интервал изменения факторов δ_i	15	6	0,17

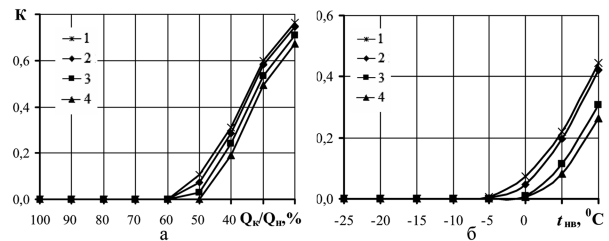


Рис.1. Изменение коэффициента K в зависимости от относительной тепловой нагрузки котла Q_K/Q_H (а) и температуры наружного воздуха $t_{нв}$ (б) при разных значениях коэффициента избытка воздуха α : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,4; 4 – 1,6.

Как видно из представленных графиков, режим работы котельной установки существенно влияет на эффективность осушения дымовых газов. В свою очередь, режимные параметры отопительного котла зависят от температурного графика котельной. Соответственно наиболее часто применяемому графику [7], температура воды в обратной магистрали $t_{об}$, а значит, и на входе в теплоутилизатор изменяется от 30 до 70 °С. При номинальной нагрузке котла, которая отвечает наиболее холодному периоду года, $t_{об} = 70$ °С и вся теплообменная поверхность теплоутилизатора работает в «сухом» режиме, без конденсации водяного пара [8, 9]. В этих условиях не реализуется обезвоживание газов. При повышении температуры окружающей среды, соответствующему снижению температуры воды в обратной магистрали ниже температуры точки росы водяного пара ($t_{об} < 50$ °С), наступает конденсационный режим работы, сопровождающийся выпадением влаги из дымовых газов. Переходу к конденсационному режиму способствует и уменьшение нагрузки котла при более высоких температурах наружного воздуха, поскольку уменьшаются температура и расход отходящих от котла дымовых газов и в теплоутилизаторе реализуется более глубокое их охлаждение.

Как видно из результатов, приведенных на рис.2, эффективность осушения дымовых газов при использовании утилизированной теплоты для нагрева холодной воды (системы горячего водоснабжения, химводоочистки и других нужд) выше и тем значительнее, чем ниже температура нагреваемой воды.

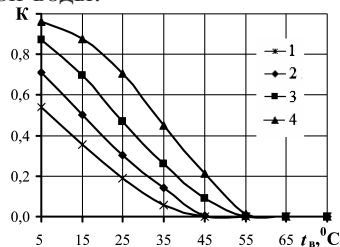


Рис.2. Зависимость коэффициента K от начальной температуры нагреваемой воды $t_в$ при разных относительных нагрузках котла $Q_K/Q_H, \%$: 1 – 100; 2 – 75; 3 – 50; 4 – 25.

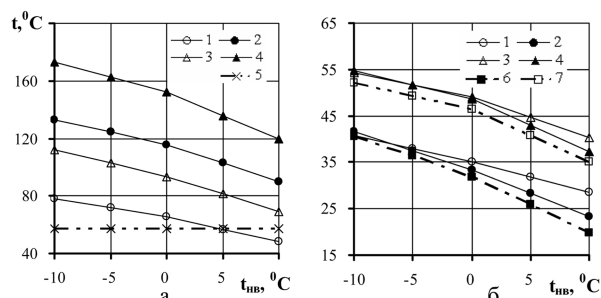


Рис.3. Зависимость температур поверхности $t_{пов}$ (1–4) и точки росы t_p (5–7) в устье металлической (1, 3) и кирпичной (2, 4) дымовой трубы от температуры наружного воздуха $t_{нв}$ при разных температурах отходящих от котла газов t_n : а) без теплоутилизационного оборудования; б) с теплоутилизационным оборудованием и подогревом дымовых газов на $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ для металлической и на $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ для кирпичной дымовой трубы; 1, 2, 6 – при $t_n = 160^\circ\text{C}$; 3, 4, 7 – при $t_n = 200^\circ\text{C}$; 5 – t_p без применения теплоутилизации.

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что режим эксплуатации котла и теплоутилизатора существенно влияет на эффект газоосушения, а соответственно соотношению (2), и на снижение температуры точки росы содержащегося в дымовых газах водяного пара.

Соблюдение условия (1) возможно, как очевидно, не только в результате снижения температуры точки росы t_p , но и при повышении температуры внутренней поверхности газоотводящих трактов, включая дымовые трубы, что достигается применением тепловых методов защиты этих трактов.

Условия конденсатообразования в газоотводящих трактах существенно зависят от теплового потенциала уходящих газов, конструктивных особенностей отводящих газоходов котельной установки и собственно дымовой трубы, а также от климатических условий. С целью увеличения температуры $t_{пов}$ при проектировании дымовых труб целесообразно применять соответствующие конструктивные усовершенствования. Основные пути в этом направлении заключаются в повышении теплоемкости материала ствола труб, увеличении толщины ствола, усилении герметичности и теплоизоляции поверхности труб, в применении вместо теплоизоляции вентилируемых каналов, а также заполнении этих каналов теплоизоляционными смесями с определенными техническими характеристиками [10]. Указанные усовершенствования значительно уменьшают возможность конденсатообразования при эксплуатации дымовых труб, но не могут ее исключить в некоторых режимах работы котельных установок и котельной в целом, особенно в условиях применения современных теплоутилизационных технологий.

При существующих конструкциях газоходов и дымовой трубы и невозможности влияния

на режимные характеристики котла соблюдение условия (1) может быть осуществлено благодаря варьированию значений расхода, температуры и влагосодержания дымовых газов на входе в газоотводящий тракт. С последним связаны известные методы по предотвращению конденсатообразования в газоотводящем тракте котельных установок при применении теплоутилизаторов конденсационного типа (с глубоким охлаждением газов). К этим методам относятся байпасирование горячих газов мимо теплоутилизатора, подсушивание охлажденных в теплоутилизаторе газов в поверхностном теплообменнике и подмешивание к газам перед их поступлением в газоотводящий тракт сухого и горячего воздуха от воздухонагревателя котла. В публикациях [4, 5, 11] проведена оценка эффективности применения каждого из указанных мероприятий для частных случаев их использования.

В данной работе представлены характерные результаты исследования тепловлажностного состояния в устье дымовой трубы при применении современных теплоутилизационных технологий с глубоким охлаждением дымовых газов и подсушиванием их в газоподогревателе, установленном после теплоутилизационного оборудования [8, 9]. Расчеты проводились для разных типов дымовых труб в проектных режимах работы котельных в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{нв}$ при разных значениях температуры дымовых газов в номинальном режиме работы котлов t_n .

На рис.3,а представлены результаты расчетов $t_{пов}$ в устье металлической и кирпичной дымовой трубы при разных значениях температуры t_n отходящих газов котлов, работающих без теплоутилизационного оборудования.

На рис.3,б приведены соответствующие данные при применении теплоутилизационных схем с подогреванием газов после теплоутилизатора. Сравнение полученных данных, показывает, что без применения теплоутилизации в устье металлической дымовой трубы даже при проектных режимах эксплуатации возможно конденсатообразование. Использование теплоутилизационных установок, оснащенных газоподогревателями, напротив, можно предотвратить выпадение влаги даже в металлической дымовой трубе, поскольку режим конденсации достигается при значительно более низких температурах поверхности в устье дымовой трубы.

Выводы

Анализ эксплуатации газоотводящих трактов существующих котельных установок свиде-

тельствует о наличии конденсатообразования в этих трактах вследствие снижения тепловой нагрузки котлов и глубокого охлаждения дымовых газов.

Применение тепловых методов защиты газоотводящих трактов при использовании теплоутилизационных технологий может существенно улучшить тепловлажный режим в отводящих газоходах и дымовой трубе и уменьшить их коррозионное разрушение, а, следовательно, увеличить ресурс эксплуатации этих трактов.

Условные обозначения

t	– температура, °С
X	– влагосодержание дымовых газов, кг/кг с.г.
Q	– теплопроизводительность, кВт
x	– уровень
K	– коэффициент осушения дымовых газов
α	– коэффициент избытка воздуха в дымовых газах
d	– интервал изменения факторов

Индекс: *верхние* в – верхний; н – нижний; о – начальный; к – конечный; *нижние* в – вода; пов – внутренняя поверхность; р – росы водяного пара; к – котла в заданном режиме; н – номинальный; нв – наружный воздух; об – обратный; i – текущий.

Список литературы

1. Kondensatheizkessel mit Wirkungsgrad uder 100 % eine Spielerei. Goddere Heinrich // Maschinenmarkt. – 1984. – Vol. 90, № 70. – P. 1586–1589.
2. Entwicklungsstand der brennwerttechnik. Janemann Theo // HLH. – 1985. – Vol. 36, № 10. – P. 501–506.
3. Безлюдный П.П., Семенюк Л.Г., Николаев В.Н., Пересичный М.И. Определение температуры точки росы продуктов сгорания природного газа //

Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1986. – № 12. – С. 89–91.

4. Пресич Г.А. Обеспечение надежной работы газового тракта котельных установок с теплоутилизаторами // Пром. теплотехника. – 2000. – Т. 23, № 6. – С. 110–115.
5. Бухаркин Е.Н. Обеспечение надежных условий эксплуатации газоотводящего тракта в котельных с конденсационными экономайзерами // Теплоэнергетика. – 1997. – № 9. – С. 29–34.
6. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
7. Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. КГМ 204 України 244–94 // Державний комітет України по житлово-комунальному господарству. – Київ, 2001. – 200 с.
8. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Прокопов В.Г. и др. Оптимизация параметров труб с поперечным оребрением в конденсационных теплоутилизаторах // Пром. теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 1–2. – С. 27–31.
9. Фиалко Н.М., Аронов И.З., Навродская Р.А., Пресич Г.А. Эффективность применения конденсационных теплоутилизаторов в системах теплоснабжения // Там же. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 36–41.
10. Чернов С.Л., Долинин И.В., Дужих Ф.П. Реконструкция железобетонной дымовой трубы с противодавлением в воздушном зазоре // Теплоэнергетика. – 2002. – № 2. – С. 29–32.
11. Фиалко Н.М., Навродська Р.О., Пресич Г.О., Меланова Н.О. Дослідження режимів роботи димових труб котельні за умов глибокого охолодження газів // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4. – С.72–74.

Поступила в редакцию 21.03.10

The Durability of Gas-Escape Channels of Boiler Installations by Modern Heat-Utilization Technologies Application Increase

Fialko N.M.¹, Prokopov V.G.², Navrodskaia R.A.², Stepanova A.I.², Presich G.A.², Shevchuk S.I.², Glushak O.U.²

¹National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

²Institute of Technical Thermophysics of NASU, Kiev

The operation analysis of gas-escape channels of Ukraine municipal heat power industry boiler installations is carried out. The influence of operating modes of boiler units and design features of gas ducts and a chimney on condensate formation processes in them is investigated. The basic ways of increasing the reliability and durability of gas-escape channels including chimneys are defined. The general aspects of using the thermal methods for prevention condensate formation in gas-escape channels of boiler installation for the purpose of its protection against corrosion and erosive destruction are considered. It is displayed that deep refrigeration and drying of smoked gases provides gas-escape channels durability increase.

Key words: boiler installations, gas-escape channels, condensate formation, gases drying, corrosion prevention.

Received March 21, 2010