УДК 621.182-5 DOI: 10.34031/ES.2022.3.003

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ МИНИМАЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ

Якимчук Н.Н.[1], Новиков А.В.[2], Хорошинина Е.Н. [2], Новоселова О.А. [2]

[1]ООО «ЭПБСпринт», г.Киров,
[2]ВятГУ, г. Киров

Аннотация

На промышленных предприятиях, построенных во времена СССР, мощность устанавливаемого котельного оборудования определялась исходя из прогнозируемого роста тепловых нагрузок. В связи с уменьшением производственных мощностей предприятий снижается потребление тепловой энергии и возникает проблема продолжительной эксплуатации паровых и водогрейных котлов при минимальных нагрузках. Эксплуатационный персонал разных предприятий эту проблему решает по-своему, не имея представления о возможных последствиях этих режимов, не предусмотренных заводами-изготовителями. В статье анализируются опасности перевода котлов на одну горелку, связанные с возникновением конденсата, приводящего к разрушению элементов выпускного тракта и дымовой трубы. При работе на высокосернистых мазутах при минимальных нагрузках создаются условия для образования в дымовых газах серной кислоты и протекания сернокислотной коррозии хвостовых поверхностей нагрева котлов. На примерах котлов ПТВМ-50 и ДЕ-25-14 показано, что при уменьшении тепловой нагрузки потери теплоты возрастают, а КПД котлов снижается. Отмечено, что характер изменения потерь теплоты в окружающую среду зависит от конструктивных особенностей котла. Даны рекомендации по модернизации котлов, работающих при минимальных нагрузках. Утверждается, что окончательное решение о возможности работы котлов с нагрузками ниже разрешенных заводами-изготовителями может быть принято только после проведения специальных испытаний с контролем циркуляции пароводяной смеси в контурах поверхности нагрева. В статье сделаны выводы, основанные на результатах исследований реального оборудования Кировской области.

Ключевые слова: *водогрейный котел, тепловая нагрузка, потери теплоты, теплопроизводительность, конденсат, сернокислотная коррозия, выпускной тракт, КПД, поверхности нагрева.*

FEATURES OF THE OPERATION OF BOILER EQUIPMENT AT MINIMUM LOADS

Nikolay Yakimchuk, Aleksey Novikov, Elena Khoroshinina, Olga Novoselova

OOO «Industrial safety expertise Sprint», Kirov
Vyatka State University, Kirov

Abstract

At industrial enterprises built in the former USSR, the capacity of the installed boiler equipment was determined based on the projected growth of heat loads. Due to the decline in production capacity of enterprises, the consumption of thermal energy is also reduced, and there is a problem of prolonged operation of steam and hot water boilers at minimum loads. The operational personnel of different enterprises solve this problem in practice in their own way, without being aware of the possible consequences of these regimes, which are not provided for by the manufacturers. The article analyses the risks of boiler transfer to one burner associated with the occurrence of condensate, which leads to the destruction of the exhaust duct and chimney. At operation on high-sulphur fuel

oil at minimum loads conditions are created for formation of sulphuric acid in flue gases and flow of sulphuric acid corrosion of tail surfaces of boiler heating. The examples of boilers ПТВМ-50 and ДЕ-25-14 show that as heat load decreases heat loss increases and boiler efficiency decreases. It is noted that the nature of the change in heat loss depends on the design of the boiler. Recommendations on modernization of boilers operating at minimum loads are given. It is stated that the final decision on the possibility of operation of boilers with loads below those permitted by manufacturers can be made only after special tests with control of circulation of steam-water mixture in heating surface circuits. The article draws conclusions based on the results of research of real equipment of the Kirov region.

Keywords: *hot water boiler, heat load, heat losses, heat capacity, condensate, sulfuric acid corrosion, exhaust duct, efficiency, heating surfaces.*

Введение

Множество промышленных предприятий, построенных в годы существования СССР для обеспечения производственных корпусов и цехов тепловой энергией и водяным паром, имеют в эксплуатации собственные котельные. Наиболее распространенными в таких котельных являются паровые двухбарабанные котлы типов ДКВР, ДЕ, КЕ с номинальным давлением 13 кгс/см^2 и паропроизводительностью от 2,5 до 25 т/ч, а также водогрейные котлы типов ПТВМ, КВГМ с теплопроизводительностью от 10 до 100 Гкал/ч.

В практике проведения режимно-наладочных испытаний [1] такого котельного оборудования на протяжении последних лет была отмечена часто поднимаемая и обсуждаемая на производстве проблема возможности работы котельного оборудования на минимальных нагрузках.

В период развития промышленности активно строились новые котельные. При этом мощность устанавливаемого котельного оборудования определялась, исходя из прогнозируемого роста тепловых нагрузок, обусловленного строительством и расширением промышленных предприятий и соответствующей инфраструктуры.

В ходе экономических процессов, имевших место в девяностые годы XX века, многие предприятия были закрыты, другие вынуждены были снизить производственные мощности. В результате установленные мощности источников тепловой энергии в значительной части оказались невостребованными. Перед эксплуатационным персоналом котельных часто стала возникать проблема продолжительной эксплуатации паровых и водогрейных котлов на минимальных нагрузках.

На котлах, оборудованных несколькими горелками, производительность часто регулируется не только изменением объемов подаваемого на горение топлива, но и изменением числа работающих горелок. Паровые котлы типа ДКВР имеют две или три горелки, установленные с фронта котла. Задача снижения тепловой нагрузки сначала решается уменьшением объема подаваемого на горение топлива при совместной работе всех горелок. После достижения минимальных допустимых давлений топлива дальнейшее снижение нагрузки часто решается путем отключения одной из горелок.

Литературный анализ показывает, что научно-обоснованных рекомендаций о возможности использования котлоагретов при работе с малой тепловой нагрузкой практически отсутствует. Эксплуатационный персонал в этих условиях в каждом отдельном случае принимает решение самостоятельно, зачастую не осознавая последствий таких решений.

Целью проведенных исследований являлась разработка рекомендаций по модернизации котлов различного типа, используемых с тепловой нагрузкой существенно меньше номинальной разрешенной заводом-изготовителем.

Материалы и методы

В настоящей работе рассмотрены особенности эксплуатации котельного оборудования в условиях минимальных нагрузок.

КПД котлов при наладочных работах, как правило, определяется по обратному балансу [2]. При этом величина КПД брутто $\eta_{бр}$, %, рассчитывается по выражению:

$$\eta_{бр}=100-(q_2+q_3+q_4+q_5), \quad (1)$$

где q_2 – потери теплоты с уходящими дымовыми газами, %; q_3 – потери теплоты с химическим недожогом топлива, %; q_4 – потери теплоты с механическим недожогом топлива, %; q_5 – потери теплоты через тепловую изоляцию в окружающую среду, %.

Потери теплоты с химическим q_3 [3] и механическим q_4 [3] недожогом топлива при оптимально настроенных горелках, как правило, практически отсутствуют. Основную часть потерь теплоты составляют составляющие q_2 и q_5. Потери теплоты с уходящими дымовыми газами q_2 [3] главным образом определяются температурой дымовых газов и содержанием в них избыточного кислорода. Если содержание кислорода во всем рабочем диапазоне нагрузок удается поддерживать оптимальным, температура уходящих газов за котлоагрегатом с ростом нагрузки будет повышаться и потери q_2 будут расти.

Потери q_5, %, при наладочных работах, как правило, определяются по выражению [2]:

$$q_5= q_{5(ном)}\cdot(Q_{ном}/Q_Ф) \quad (2)$$

где $q_{5(ном)}$ – потери теплоты в окружающую среду при номинальной нагрузке котла, %, определяются по справочной литературе, например [2]; $Q_{ном}$ и $Q_Ф$ – соответственно номинальная производительность и фактическая нагрузка котла в конкретном режиме, Гкал/ч или т/ч.

Можно отметить, что с уменьшением нагрузки потери q_5 растут и будут иметь наибольшее значение при минимальных нагрузках.

Пример зависимостей потерь q_2 и q_5 от теплопроизводительности, полученных при режимно-наладочных работах, приведен на рис. 1.

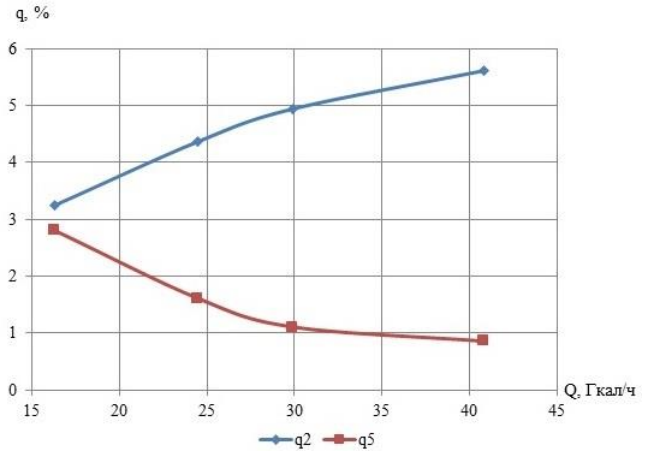

Рис. 1. Пример зависимости потерь теплоты q_2 и q_5 от теплопроизводительности водогрейного котла ПТВМ-50 при работе на природном газе

Степень и характер изменения потерь q_2 при изменении температуры дымовых газов зависит от конструктивных особенностей котла. При установке водяного экономайзера в качестве хвостовых поверхностей нагрева температура дымовых газов на

выходе из котлоагрегата при изменении нагрузки может изменяться незначительно и мало влиять на изменение q_2. Следует отметить, что далеко не всегда конструкция горелок позволяет в минимальных режимах получить содержание кислорода в дымовых газах на оптимальном уровне. При малых расходах топлива и воздуха, подаваемого на горение, энергия воздушных потоков недостаточна для эффективного завихрения и полного смешивания топлива с воздухом в горелочном устройстве. Для исключения возможности появления химического недожога топлива приходится завышать подачу дутьевого воздуха на горелки и тем самым увеличивать содержание кислорода в дымовых газах. Это в свою очередь приводит к повышению потерь q_2 при минимальных нагрузках. По указанным причинам в ряде случаев зависимость q_2 от производительности котлоагрегата может принимать вид, приведенный на рис. 2.

Зависимость КПД котла с учетом вышеизложенного будет иметь вид, приведенный на рис. 3. Наблюдается тенденция к снижению КПД при минимальных нагрузках.

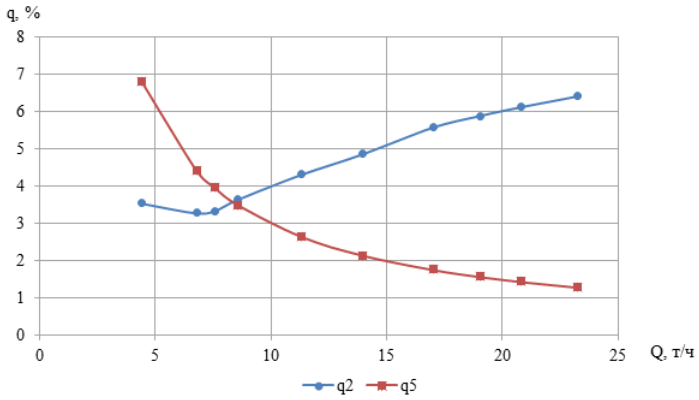

Рис. 2. Пример зависимости потерь теплоты q_2 и q_5 от теплопроизводительности парового котла ДЕ-25-14 при работе на природном газе

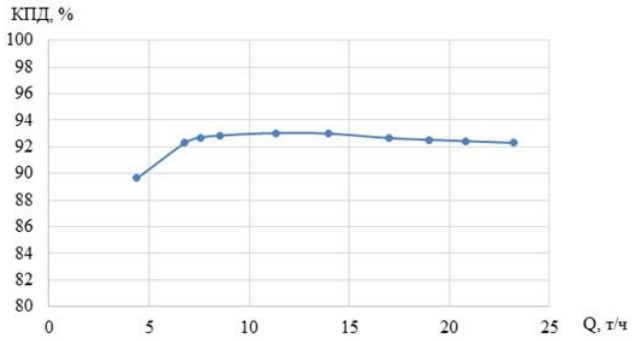

Рис. 3. Пример зависимости КПД парового котла ДЕ-25-14 при работе на природном газе

При работе на газообразном топливе температура уходящих дымовых газов имеет меньшую величину (а содержание водяных паров, наоборот, наибольшее) по сравнению с эксплуатацией на других видах топлива. При минимальных нагрузках температура дымовых газов снижается до величин, сопоставимых с «точкой росы». При этом происходит интенсивное образование конденсата в выпускном газовом тракте и особенно в дымовой трубе. Начинаются процессы коррозии, которые могут приводить к разрушениям элементов газового тракта и дымовой трубы. Дымовые трубы, изначально спроектированные для работы котельной на твердом или жидком топливе, после ее перевода на сжигание природного газа оказываются в режимах работы, далеких от расчетных, как по температурам, так и по скоростям движения дымовых газов [6].

Известны случаи, когда после перевода котлов с твердого или жидкого топлива на газообразное буквально за три – четыре года эксплуатации дымовая труба приходила в аварийное состояние [5, 7].

При эксплуатации котлов на мазуте с повышенным содержанием серы в дымовых газах наблюдается повышенное содержание соединений серы, в основном диоксида SO_2, и незначительных количеств триоксида серы SO_3, который при температурах ниже «точки росы» образует серную кислоту. Серная кислота вызывает интенсивную коррозию металла низкотемпературных поверхностей нагрева [8].

Отдельно следует остановиться на опасных явлениях, возникающих при попытках эксплуатировать паровые водотрубные котлы с нагрузками менее разрешенных заводом-изготовителем. При этом следует учитывать возможные нарушения режимов циркуляции пароводяной смеси в трубах поверхностей нагрева. Минимальная нагрузка, указанная в документации котла, обеспечивает необходимые скорости потоков пароводяной смести в трубах. При меньших нагрузках появляется риск возникновения застойных зон, в которых движение пароводяной смеси замедляется или вовсе останавливается. В таких местах происходят локальные перегревы стенок экранных труб. Металл труб теряет свои прочностные свойства и могут произойти разрывы стенок.

При необходимости эксплуатации котлов с нагрузками ниже допустимых заводом следует провести нестандартные исследовательские наладочные работы. В ходе данных исследований проверяется работа котла на различных минимальных нагрузках с одновременными измерениями скоростей потоков пароводяной смеси в отдельных контурах экранных труб. Для этого производится врезка специальных измерительных устройств в стенки труб. Только по итогам таких работ выявляются индивидуальные специфические условия, обеспечивающие безопасную продолжительную работу котла с нагрузками менее указанных в заводских инструкциях.

В практике эксплуатации котлов, снабженных двумя горелками, при необходимости достижения минимальных нагрузок встречаются попытки работы только на одной горелке. На котле ДКВР-2,5-13, к примеру, две горелки расположены горизонтально на фронтальной стенке топки. Если одна из горелок отключена, факел в топке становится несимметричным. Поверхности нагрева обогреваются неравномерно. Экранные трубы одной, более холодной, стороны топки будут работать в условиях, когда на стенках труб образуется конденсат. Если котел работает на мазуте, то будет происходить образование серной кислоты и интенсивное разрушение металла труб экранов. Дополнительно повышается риск нарушения циркуляции пароводяной смеси в трубах «более холодного» экрана, образования застойных зон и местных перегревов металла.

При проведении экспертизы промышленной безопасности после продолжительной эксплуатации котла ДКВР-2,5-13 на мазуте с одной отключенной горелкой, было выявлено уменьшение толщины стенок труб «более холодного» экрана с 2,5 до 0,8 мм (при минимальной допустимой толщине 1,6 мм). Трубы второго «более горячего» экрана при этом оставались практически не пострадавшими.

Выводы

1. Продолжительная работа паровых и водогрейных котлов с минимальными нагрузками сопровождается ухудшением экономичности работы, снижением КПД.

2. При минимальных нагрузках из-за сниженной температуры дымовых газов происходит интенсивное образование конденсата в газоходах и в дымовой трубе, что приводит к коррозионному разрушению.

3. При работе на высокосернистых мазутах на минимальных нагрузках создаются условия для образования в дымовых газах серной кислоты и протекания сернокислотной коррозии хвостовых поверхностей нагрева котлов.

4. Возможность работы паровых водотрубных котлов с нагрузками, ниже разрешенных заводом-изготовителем допустима только после проведения специализированных испытаний, в ходе которых проводится контроль циркуляции пароводяной смеси в контурах поверхностей нагрева.

5. Работа двухгорелочных котлов с одной отключенной горелкой, особенно на мазуте, приводит к интенсивной коррозии и разрушению отдельных экранов.

В статье рассматриваются только общие тенденции и закономерности, замеченные в процессе практических работ по промышленным испытаниям котлоагрегатов, поднимается тема для обсуждения, ставятся вопросы для изучения. Экспериментальных материалов пока недостаточно для достоверных аналитических зависимостей. Этот вопрос остается предметом дальнейшего изучения рассматриваемой проблемы.

Библиографический список

1. Приказ Минэнерго РФ от 24.03.2003 N 115 "Об утверждении Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 02.04.2003 N 4358) [Электронный ресурс]. URL: https://bazanpa.ru/minenergo-rossii-prikaz-n115-ot24032003-h716051/.
2. Трембовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок: производственно-практическое издание; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.
3. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.
4. Типовая инструкция по эксплуатации металлических дымовых труб энергопредприятий: РД 153-34.0-21.524-98. М.: Департамент стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России», 1999. 35 с.
5. Кузнецов В. А. Шуршакова Е. В. Сравнительные исследования эффективности сжигания природного газа в топках с подовыми горелками при переводе котлов с твёрдого топлива на природный газ // Экология и строительство. 2016. №1. С. 4-6. EDN: WBFSWV
6. Выдрин В. Н. Зубко О. В. Проблемы дымовых кирпичных труб в результате нестабильности тепловых нагрузок при проведении экспертизы промышленной безопасности // Символ науки. 2015. №9. С. 58–62. EDN: UJZZUP
7. Стриха И. И. Надежность работы дымовых труб [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. 2009. № 3. С. 20-24.
8. Котлер В. Р. Сжигание высокосернистых мазутов [Электронный ресурс] // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2011. № 3(8). С. 16-18. URL: https://aqua-therm.ru/articles/articles_197.html.
9. Котлер В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 144 с.

References

1. Ministry of Energy of the Russian Federation (2003, March 24). Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii teplovykh energoustanovok [*On approval of the Rules for the technical operation of thermal power plants*]. https://bazanpa.ru/minenergo-rossii-prikaz-n115-ot24032003-h716051/. [In Russian]
2. Trembovlya, V. I., Finger, Ye. D., & Avdeyeva A. A. (1991). *Teplotekhnicheskiye ispytaniya kotel'nykh ustanovok* [*Thermal engineering tests of boiler plants*] (2nd ed.). Energoatomizdat. [In Russian]
3. Ravich, M. B. (1977). *Effektivnost' ispol'zovaniya topliva* [*Fuel efficiency*]. Nauka. [In Russian]
4. Mardukhayev, I. N. (1999). *Tipovaya instruktsiya po ekspluatatsii metallicheskikh dymovykh trub energopredpriyatiy: RD 153-34.0-21.524-98* [*Standard operating instructions for metal chimneys of power enterprises*]. Department of Development Strategy and Science and Technology Policy of RAO "UES of Russia". [In Russian]
5. Kuznetsov, V. A., & Shurshakova, Ye. V. (2016). Sravnitel'nyye issledovaniya effektivnosti szhiganiya prirodnogo gaza v topkakh s podovymi gorelkami pri perevode kotlov s tvordogo topliva na prirodnyy gaz [Comparative studies of the efficiency of natural gas combustion in furnaces with

hearth burners when converting boilers from solid fuel to natural gas]. *Ecology and Construction, 1*, 4-6. [In Russian]
6. Vydrin, V. N., & Zubko, O. V. (2015). Problemy dymovykh kirpichnykh trub v rezul'tate nestabil'nosti teplovykh nagruzok pri provedenii ekspertizy promyshlennoy bezopasnosti [Problems of brick chimneys as a result of instability of thermal loads during the examination of industrial safety]. *Symbol of Science, 9*, 58-62. [In Russian]
7. Strikha, I. I. (2009). Nadezhnost' raboty dymovykh trub [Reliability of the chimneys]. *News of heat supply, 3*, 20-24. [In Russian]
8. Kotler, V. R. (2011). Szhiganiye vysokosernistykh mazutov [Combustion of high-sulphur fuel oils]. *Promyshlennye i otopitel'nye kotel'nye i mini-TEC*, *3*(*8*), 16-18. [In Russian]
9. Kotler, V. R. (1987). *Oksidy azota v dymovykh gazakh kotlov [Nitrogen oxides in flue gases from boilers]*. Energoatomizdat. [In Russian]

Сведения об авторах

Якимчук Николай Николаевич, канд. техн. наук, инженер-эксперт.
ООО «Экспертиза промышленной безопасности Спринт», г. Киров

Новиков Алексей Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции».
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров
SPIN-код: 9626-6481. ORCID: 0000-0003-0138-7174. E-mail: novikov@vyatsu.ru.

Хорошинина Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры «Электрические станции».
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров
SPIN-код: 1487-3092. E-mail: en_horoshinina@vyatsu.ru

Новоселова Ольга Александровна, старший преподаватель кафедры «Электрические станции»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», г. Киров
SPIN-код: 8403-1055. E-mail: novoselova@vyatsu.ru

Authors about

Yakimchuk Nikolay Nikolaevich, Cand. of Tech. Sciences, expert engineer
OOO Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti Sprint (Industrial safety expertise Sprint), Kirov, Russian Federation

Novikov Aleksey Viktorovich, Cand. of Tech. Sciences, Associated Professor, Head of Department of Electric Stations
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation
ORCID: 0000-0003-0138-7174. E-mail: novikov@vyatsu.ru

Khoroshinina Elena Nikolaevna, Senior Lecturer of Department of Electric Stations
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.
E-mail: en_horoshinina@vyatsu.ru

Novoselova Olga Alexandrovna, Senior Lecturer of Department of Electric Stations
Vyatka State University, Kirov, Russian Federation
E-mail: novoselova@vyatsu.ru