

УДК 662.613

## Оценка эффективности технологий утилизации энергии уходящих газов котлов, включающей теплоту конденсации водяных паров

В.К. Елсуков

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

elswk@mail.ru

Статья поступила 16.12.2013, принята 19.02.2014

*На основе анализа литературных данных, исследований, проведенных автором лично и с магистрантами, рассматриваются технологии утилизации энергии уходящих газов котлов, включающей теплоту конденсации водяных паров. Задачами исследований являются определение наиболее эффективных технологий указанной утилизации и уточнение условий их применения. Выделяются следующие проблемы внедрения рассматриваемых технологий: опасность ухудшения санитарно-гигиенического и технологического качества нагреваемой воды в контактных теплообменниках либо приобретение сильных коррозионных свойств конденсатом, выделившимся из газов на поверхностных теплообменниках; сложность и не всегда высокая надежность схем подсушки дымовых газов после теплоутилизатора; различие и сложность методик расчета теплоутилизаторов дымовых газов с конденсацией водяных паров. Предлагаются пути решения указанных проблем. Кратко указываются ошибки в существующих методиках теплового расчета различных теплообменных аппаратов в рассматриваемых технологиях. Показана высокая экономическая эффективность внедрения технологий утилизации энергии уходящих газов, включающей теплоту конденсации водяных паров, на теплоисточниках, работающих как на природном газе, так и на буром угле. Рассмотрены и описаны условия эффективного применения этих технологий. Отмечена необходимость дальнейших исследований по уточнению значений коэффициентов теплопередачи в контактных экономайзерах и поверхностных теплообменниках (при конденсации водяных паров).*

**Ключевые слова:** энергосбережение, технологии, теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), котельная, контактный экономайзер, теплообменник поверхностного типа, конденсация водяных паров.

## Efficiency assessment of utilization technologies of boiler's exit gas energy including heat of steam condensation

V.K. Elsukov

Bratsk State University, 40 Makarenko St, Bratsk, Russia

elswk@mail.ru

Received 16.12.2013, accepted 19.02.2014

*Utilization technologies of boiler's exit gas energy including heat of steam condensation have been considered using the analysis of the published data and the investigations made by the author of this article personally and in collaboration with Master students. The objectives of the study are the detection of the most effective technologies for the mentioned utilization and the specification of their application conditions. The following problems of implementation of the technologies have been emphasized: the danger of deteriorating sanitary hygienic and technological quality of heated water in contact heat exchangers; acquisition of strong corrosive properties by the condensate released from the surface heat exchangers gas; complexity and not always high reliability of the flue gases drying schemes after the heat recovery; the difference and complexity of calculation methods of flue gas heat recovery with water vapor condensation. The ways to solve these problems have been suggested. The errors of existing methods of various heat exchangers' thermal calculation in these technologies have been shown briefly. High economic efficiency of utilization technologies of energy exit gases including the heat of water vapor condensation on the heat sources operating on both natural gas and lignite has been demonstrated. The conditions of effective application of these technologies have been examined and described. The need for further research to clarify the values of heat transfer coefficients in the contact economizers and surface heat exchangers (in presence of the water vapor condensation) has been highlighted.*

**Keywords:** energy saving, technologies, combined heat-and-power plant, boiler house, contact economizer, surface-type heat exchanger, condensation of water steam.

**Введение.** Снижение потерь тепла с уходящими газами может быть наиболее значимым энергосберегающим мероприятием на энергоисточниках, использующих органическое топливо. Возможный выигрыш энергии возрастает в разы, если включает в себя теплоту конденсации водяных паров, содержащихся в дымо-

вых газах. Технологии утилизации энергии уходящих газов котлов, включающей теплоту конденсации водяных паров (далее – технологии утилизации тепла уходящих газов с конденсацией водяных паров), предполагают использование теплообменников контактного либо поверхностного типов, в которых температура

дымовых газов может снижаться до 30-40 °С и менее. В работе [1] отмечены следующие технические проблемы, препятствующие развитию технологий:

1. Опасность ухудшения санитарно-гигиенического и технологического качества нагреваемой воды в контактных теплообменниках либо приобретение сильных коррозионных свойств конденсатом, выделившимся из газов на поверхностных теплообменниках.

2. Сложность и не всегда высокая надежность схем подсушки дымовых газов после теплоутилизатора.

3. Различие и сложность методик расчета теплоутилизаторов дымовых газов с конденсацией водяных паров.

Задачами исследований являются определение наиболее эффективных технологий утилизации энергии уходящих газов, включающей конденсацию водяных паров, и уточнение условий их применения с учетом указанных проблем.

Объектом исследования была районная котельная 45 квартала г. Братска, которую планируется перевести с угля на местное газовое топливо. На котельной установлены паровые котлы типа КЕ-50-14 и водогрейные – типа КВТС-30-150 П, от которых в окружающую среду выбрасываются дымовые газы с температурами до 200 °С (при сжигании природного газа эти температуры составят 160-170 °С).

Чтобы «обойти» первую проблему, в [2] предложено в контактном подогревателе-охладителе газов нагревать циркуляционную воду, которую затем использовать в другом контактном подогревателе для нагрева холодного дутьевого воздуха. В этом случае схема движения циркуляционной воды является замкнутой, что исключает загрязнение подпиточной воды, направляемой на горячее водоснабжение. Отметим, что при использовании такой схемы число контактных подогревателей увеличится сравнительно со схемой, где подогревать дутьевой воздух не требуется.

В [3] отмечается, что коррозионная активность воды, нагреваемой в контактных экономайзерах, зависит от температуры нагрева и исходной бикарбонатной щелочности (ЩБК). При ЩБК < 1 мг-экв/л вода не агрессивна, при ЩБК в интервале от 1 до 2 приобретает незначительную коррозионную активность, при ЩБК < 1 мг-экв/л вода становится агрессивной, и необходима ее дегазация (например, во встроенных деаэраторах [3]). По мнению автора [3], применение нагретой в контактных экономайзерах воды для бытовых и технологических нужд не представляет опасности для человека из-за сравнительно низких концентраций в дымовых газах оксидов углерода и азота. Отметим, что такой вывод справедлив при качественном сжигании топлива.

При использовании поверхностных теплообменников образующийся на них конденсат будет агрессивным, что потребует применения для его удаления трубопроводов из коррозионно-стойких материалов.

Решение первой проблемы возможно и при использовании поверхностных теплообменников, например, биметаллических калориферов, которые стали в последние годы производиться Костромским калориферным заводом [4]. Наружный слой теплообменных элементов (оребрение) этих калориферов выполнен из коррозионно-стойкого материала, каким является алюминий.

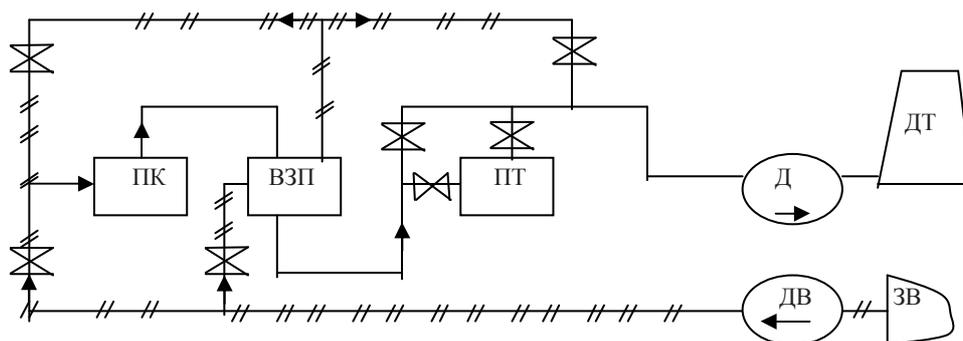
Подсушка дымовых газов (решение второй пробле-

мы) наиболее рационально может быть осуществлено путем их разбавления после утилизатора более сухим, теплым воздухом. Так, по результатам расчетов [1], добавка к дымовым газам с температурой 30 °С 10 процентов горячего воздуха с температурой 150 °С повышает температуру образующейся смеси газов до 40 °С и снижает ее относительную влажность до 60 %. Горячий воздух с указанной температурой может быть взят от котлов с воздухоподогревателями. При отсутствии таких котлов может быть использован теплый воздух из помещения котельной, величина добавки (его к газам) существенно возрастет. Реализация технологии требует предварительного уточнения условий работы дымовой трубы. В большинстве случаев для исключения в ней статических давлений в летнее время требуется подогрев дымовых газов сравнительно с температурой атмосферного воздуха (примерно на 10 и более градусов).

Таким образом, в любое время года для исключения разрушения дымовой трубы необходимо подмешивание к дымовым газам горячего воздуха, который может быть получен в имеющихся или устанавливаемых воздухоподогревателях (ВЗП). Поверхность нагрева этих ВЗП может быть снижена сравнительно с котлами на твердом топливе, поскольку для подогрева дымовых газов нужен небольшой расход воздуха. Принципиальная схема установки теплообменника для утилизации тепла дымовых газов представлена на рисунке 1.

**Методика исследований.** Методика состояла в определении параметров теплоносителей, используемых в рассматриваемых технологиях, и определении их технико-экономических показателей: поверхности нагрева различных теплообменников, экономического эффекта и срока окупаемости. Краткий алгоритм расчета эффективности технологии с контактными экономайзерами (К.Э.) включал в себя [3]: задание температуры уходящих газов на входе и выходе из К.Э., определение теплопроизводительности К.Э. ( $Q_{К.Э.}$ ), задание температуры воды на входе и выходе из К.Э., определение расхода воды на входе и выходе из К.Э., расчет числа Рейнольдса ( $Re$ ) и плотности орошения ( $H_v$ ) при заданном диаметре К.Э., определение по номограммам значений теплонапряжения объема насадочной камеры ( $q_v$ ) и объемного коэффициента теплообмена ( $K_v$ ), оценку объема (площади поверхности нагрева).

При определении высоты насадочного слоя контактного теплоутилизатора, выполненного по двум методикам [3, 5], были получены существенно различающиеся результаты. Конструктивными тепловыми расчетами по методике [3] была выявлена значительная невязка тепловосприятий, рассчитанных по балансу и по уравнению теплопередачи для режима с низким коэффициентом орошения ( $H_w \approx 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ ). Уточнение методик представляется возможным после накопления дополнительных материалов экспериментальных исследований. Для экономических оценок в [1] были использованы конструктивные и технологические параметры теплоутилизаторов, рассчитанные согласно [3], поскольку они в большей степени соотносятся с другими литературными источниками.



**Рис.1.** Принципиальная схема установки поверхностных теплообменников для утилизации энергии уходящих газов в газовоздушном тракте котельной. ПК-паровой котел; ВЗП-воздухоподогреватель; ПТ-поверхностный теплообменник; Д-дымосос; Д-дутьевой вентилятор; ДТ-дымовая труба; ЗВ-забор воздуха ; - - - воздухопроводы; — газоходы

Требуют дополнительных экспериментальных проверок значения коэффициентов теплопередачи поверхностных теплообменников при условии конденсации водяных паров, приведенные в [5] (с учетом различных значений критерия орошения).

Экономический эффект от применения рассматриваемых технологий может существенно меняться в зависимости от вида теплоисточника (ТЭЦ или котельная). При внедрении технологии на ТЭЦ эффект должен учитывать возможное снижение теплофикационной выработки электроэнергии. Методика расчета экономического эффекта в различных экономических ситуациях изложена в [6, 7].

**Результаты исследований.** Автором совместно с магистрантами выполнены расчеты технико-экономических показателей от внедрения на котельной открытой системы теплоснабжения (за котлом паропроизводительностью 60 т/ч) следующих технологий: контактных экономайзеров при сжигании природного газа; поверхностных теплообменников при сжигании природного газа и бурого угля.

Срок окупаемости технологий варьируется, в зависимости от затрат на топливо и теплообменники, от 3 до 6 месяцев. Небольшое увеличение срока окупаемости (до 1 месяца) получено при сжигании на теплоисточнике угля сравнительно с природным газом. Годовой эффект составил порядка 5 млн. рублей от уменьшения расхода природного газа в ценах 2010 года (Братск), а коэффициент использования топлива на котле (брутто) увеличился приблизительно до 108 %.

Расчетами не выявлены заметные экономические преимущества контактных экономайзеров (в вышеописанной замкнутой схеме движения циркуляционной воды) над поверхностными теплообменниками. Из этого следует предварительный вывод, что вид теплообменника и схема его включения в газовоздушный тракт теплоисточника определяется тепловой схемой теплоисточника и параметрами теплоносителей, перемещаемых в ней. В частности, в котельных открытых систем теплоснабжения (с большими расходами сырой воды) целесообразно применять поверхностные теплообменники, а в котельных закрытых систем – контактные экономайзеры с замкнутой схемой движения циркуляционной воды.

#### Выводы

1. Показана высокая экономическая эффективность

внедрения технологий утилизации энергии уходящих газов, включающей теплоту конденсации водяных паров, на теплоисточниках, использующих как природный газ, так и бурый уголь.

2. Рассмотрены и описаны условия эффективного применения этих технологий.

3. Необходимы дальнейшие исследования по уточнению значений коэффициентов теплопередачи в контактных экономайзерах и поверхностных теплообменниках (при конденсации водяных паров).

#### Литература

1. Елсуков В.К., Пак Г.В. Исследование технологий утилизации теплоты уходящих газов при конденсации водяных паров // Труды Братского государственного технического университета. 2001. Т. 2. С. 46-48.
2. Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г., Трёмбовля В.И. Резервы энерго- и ресурсосбережения в крупных котельных промышленной и коммунальной энергетики // Промышленная энергетика. 2004. № 1. С. 2-16.
3. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Л.: Недра, 1990. 280 с.
4. Калорийный завод, Кострома. [Электронный ресурс] <http://www.kkz.ru>. 12.02.13.
5. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 139 с.
6. Елсуков В.К. Оценка возможностей утилизации тепла уходящих газов на примере сжигания канско-ачинских углей // Промышленная энергетика. 2007. № 11. С. 21-28.
7. Елсуков В.К. Комплексные исследования эффективности источников энергии в системах централизованного теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра технических наук. Иркутск, 2012. 40 с.

#### References

1. Elsukov V.K., Pak G.V. Investigation of the heat recovery technology of flue gases with water vapor condensation // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2001. V.2. P.46-48.
2. Olkhovskiy G.G., Tumanovskiy A.G., Trembovlya V.I. Reserves of power and resource saving in large boilers of industrial and municipal power engineering // Promyshlennaya energetika. 2004. №1. P. 2-16.
3. Aronov I.Z. Contact water heating with the help of natural gas combustion products. L.: Nedra, 1990. 280p.
4. Kostroma air heater factory [Electronic source]: URL: <http://www.kkz.ru>. 12.02.13.
5. Kudinov A.A. Power saving in thermal generation plants. Ulyanovsk: UISTU, 2000.139 p.
6. Elsukov V.K. Evaluation of the possibility of flue gases heat recovery using the combustion of Kansk-Achinsk coal // Promyshlennaya energetika. 2007. № 11. P. 21-28.
7. Elsukov V.K. Complex investigations of energy sources efficiency in central heating systems. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Science (author's abstract). Irkutsk. 2012, 40 p.

УДК 519.87

## Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой

С.А. Дяконитса<sup>а</sup>, И.Р. Сугачевский<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>а</sup>diaconitsa@mail.ru, <sup>б</sup>katanig@mail.ru

Статья поступила 24.12.2013, принята 18.02.2014

*На сегодняшний день системы управления технологическими процессами основываются на объединении нескольких простых одноконтурных систем. Внутренняя структура таких систем является весьма сложной, ведь каждый из каналов регулирования связан с другими каналами посредством перекрестных связей, в результате чего происходит значительное снижение качества регулирования технологических параметров объекта. Для устранения взаимных связей между каналами регулирования рассматривается метод построения систем управления с использованием специальных дополнительных устройств-компенсаторов, которые настраиваются таким образом, чтобы свести к минимуму перекрестные связи в управляемом многопараметрическом объекте. В связи со сложностью математических вычислений в настоящий момент крайне мало исследований, связанных с изучением многосвязного управления многопараметрическими системами с применением компенсирующего регулирования, и разработок соответствующих физических решений. Исходя из этого, возникает необходимость создания новых методов и алгоритмов определения оптимальных настроек параметров регулирования, основанных на принципе динамической компенсации в многопараметрических системах. Метод многосвязного управления многопараметрической системой с применением компенсирующего регулирования является весьма актуальным и практически значимым. Изучая поведение системы, построенной по данному методу, можно сделать выводы об эффективной работе корректирующих устройств.*

**Ключевые слова:** многопараметрические динамические системы, перекрестные связи, корректирующие устройства.

## Using compensatory regulation for multivariate control of multi-parameter system

S.A. Dyakonitsa<sup>а</sup>, I.R. Sugachevskiy<sup>б</sup>

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia.

<sup>а</sup>diaconitsa@mail.ru, <sup>б</sup>katanig@mail.ru

Received 24.12.2013, accepted 18.02.2014

*Today's technological process control systems are based on combining several simple one-loop systems. The inner pattern of such systems is rather complex, because each regulation channel is connected to other channels by cross couplings and, therefore, regulation quality of object technological parameters is deteriorate heavily. To overcome the mutual relations between regulation channels there has been studied the method of creation of control systems by using special additional compensatory devices which are set up to minimize cross couplings in controlled multi-parameter object. Due to the complexity of mathematical computations, there are little researches connected with studying the multivariate control of multi-parameter systems with compensatory regulation, and development of relevant physical decisions. Hence, there is a need of creation of new methods and algorithms to determine optimal settings of regulation parameters based on the dynamic compensatory principle in multi-parameter systems. The method of multivariate control of multi-parameter system with compensatory regulation is topical and practice-significant. By studying the behavior of the system constructed with this method, it is possible to conclude that compensatory devices work effectively.*

**Keywords:** multi-parameter systems, multivariate control, compensatory regulation.

**Введение.** Существующие системы управления технологическими процессами представляют собой сложные многопараметрические динамические системы с несколькими входными и выходными величинами. Существенное влияние на управление и оптимизацию таких систем оказывает их внутренняя структура, которая, помимо основных каналов регулирования, содержит перекрестные связи, приводящие к тому, что возмущения посредством регуляторов начинают оказывать влияние не только на собственные, но и на другие регулируемые величины системы.

Применяемый в настоящее время математический аппарат для оптимизации работы многопараметрических систем основан на адаптации только настроечных параметров отдельных участков каналов регулирующих воздействий, что не позволяет осуществлять более качественную стабилизацию контролируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект управления.

Очевидно, что самой оптимальной системой управления для такого типа объектов является система, использующая корректирующие устройства, выбранными таким образом,