УДК 697.326.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧАСТИ КОНДЕНСАЦИОННОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА*

Ст. преп. **Губарев А.В.**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация. *В статье приводятся результаты обработки экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний конденсационного водогрейного котла, разработанного сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова. Область применения котла – автономные системы теплоснабжения. Использование котла в таких системах позволяет достичь значительной экономии топлива, затрачиваемого на выработку единицы теплоты. Приводятся зависимости параметров энергоносителей, а также коэффициентов теплопередачи от производительности котла.*

Ключевые слова: *конденсационный водогрейный котел, испытательный стенд, результаты испытаний.*

Во многих европейских странах для нужд теплоснабжения используются автономные системы [1]. В последние десятилетия увеличилась доля таких систем и в России [2]. Достоинства автономных систем теплоснабжения: отсутствие протяженных тепловых сетей [3], более простое регулирование отпуска теплоты тепловым источником [4], меньшие затраты на обслуживание и ремонт оборудования [5].

Наблюдается повышение доли устанавливаемых в тепловых источниках указанных систем конденсационных водогрейных котлов. В этих котлах имеет место охлаждение продуктов сгорания до температур, при которых происходит конденсация части водяных паров. В некоторых странах происходит полное замещение котельного парка автономных систем теплоснабжения конденсационными котлами [6]. В таких котлах также дополнительно экономится до 15 % топлива.

Сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова разработана конструкция конденсационного водогрейного котла для использования его в автономных системах теплоснабжения [7]. Данный котел –

* *Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

двухконтурный. В первом контуре (высокотемпературной части) сжигается топливо и вырабатывается теплоноситель на нужды отопления. Во втором контуре – контактно-рекуперативной части – происходит глубокое охлаждение продуктов сгорания, конденсация из них части водяных паров, и подготавливается теплоноситель для горячего водоснабжения. Указанные части котла связаны между собой адиабатной частью, в которой происходит изоэнтальпное охлаждение и увлажнение газов при их непосредственном контакте с распыляемой в поток газов водой.

Были проведены испытания образца котла теплопроизводительностью 250 кВт для определения его теплотехнических характеристик.

Цель работы – представление результатов экспериментальных исследований высокотемпературной части образца котла.

Для проведения экспериментальных исследований работы котла и определения его теплотехнических показателей в процессе работы был создан испытательный стенд [8], схема которого приведена на рис. 1.

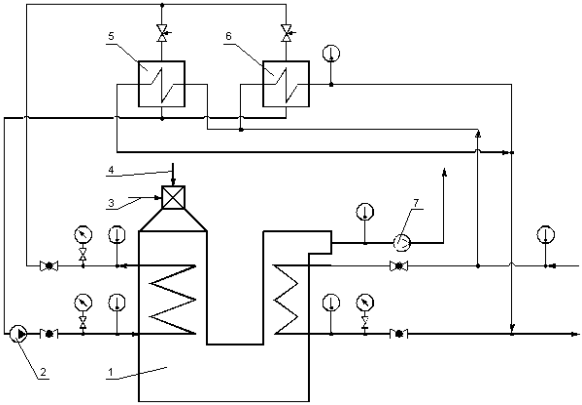

Рис. 1. Схема испытательного стенда конденсационного водогрейного котла:

1 – конденсационный водогрейный котел; 2 – насос системы отопления; 3 – воздух; 4 – топливо; 5 – теплообменник, имитирующий потребителя системы отопления; 6 – подогреватель воды на горячее водоснабжение; 7 – дымосос

В состав теплового оборудования стенда, кроме котла, включены два кожухотрубных теплообменника. Один из них имитирует потребителя системы отопления. В межтрубное пространство этого теплообменника поступает вода, нагретая в высокотемпературной части котла.

Здесь она охлаждается протекающей внутри трубок холодной водопроводной водой до параметров обратной воды системы отопления. Охлажденная вода поступает обратно в котел.

Во втором теплообменнике вода хозяйственно-питьевого качества, протекающая в трубном пространстве, нагревается до параметров воды на нужды горячего водоснабжения. Нагрев воды осуществляется за счет охлаждения воды, полученной в высокотемпературной части котла. Подогретая в указанном теплообменнике вода, смешивается с водой, нагретой в контактно-рекуперативной части котла.

Таким образом, с помощью второго теплообменника производится регулирование соотношения теплоты, направляемой системой на отопление и на горячее водоснабжение.

Работа стенда осуществляется следующим образом. Высокотемпературная часть котла, а также межтрубное пространство теплообменных аппаратов заполняется обессоленной водой, а в трубки трубного пучка контактно-рекуперативной части направляется с постоянным расходом холодная вода хозяйственно-питьевого качества. Для охлаждения в теплообменниках воды, нагретой в высокотемпературной части котла, в их трубное пространство направляется холодная водопроводная вода. В ходе испытаний подогретая в теплообменнике, имитирующем потребителей системы отопления, вода сбрасывается в канализацию. Охлаждающая вода после выхода из подогревателя воды на горячее водоснабжение, смешивается с водой, нагретой в контактно-рекуперативной части, и также сбрасывается в канализацию.

В процессе определения теплотехнических характеристик котла производились измерения следующих параметров: расхода газа, коэффициента избытка воздуха, температур воды на входе в высокотемпературную часть котла и на выходе из нее, воды на входе в контактно-рекуперативную часть и на выходе из нее, а также температур продуктов горения на выходе из высокотемпературной части и из котла.

Для определения теплотехнических характеристик высокотемпературной части котла, пользуясь измеренными значениями, производились расчеты горения топлива, параметров газов в топке, на выходе из высокотемпературной части и из котла, составление теплового баланса котла, расчеты теплообмена в топке и в дымогарных трубах.

В процессе выполнения расчета горения топлива по стандартным методикам определялись объемы сухих и влажных продуктов сгорания и компонентов, входящих в их состав, приходящиеся на 1 м^3 сжигае-

мого природного газа. Кроме того, была определена адиабатическая температура горения.

Для дальнейших расчетов было необходимо определить параметры продуктов горения при нормальных условиях и при рабочих условиях в контрольных точках котла: в топке при адиабатической температуре (параметрам присваивался индекс Г1), на выходе из высокотемпературной части котла (Г3) и на выходе из котла (Г5).

Также были определены объемные расходы при нормальных и рабочих условиях, а также массовые расходы газов в контрольных точках. Так как в процессе охлаждения продуктов сгорания в адиабатной и контактно-рекуперативной частях изменяется их влагосодержание, массовый расход уходящих газов определялся по формуле, кг/с

$$G_{\Gamma 5} = G_{\text{с.г}}\left(1 + x_{\Gamma 5}\right) \tag{1}$$

где $G_{\text{с.г}}$ – массовый расход сухих газов; $x_{\Gamma 5}$ – влагосодержание газов на выходе из котла.

Энтальпии продуктов сгорания в контрольных точках котла определялись по формуле, кДж/кг сухих газов

$$I_{\Gamma} = \left(c_{\text{с.г}} + c_{\text{в.п}} x_{\Gamma}\right) t_{\Gamma} + r_0 x_{\Gamma} \tag{2}$$

где $c_{\text{с.г}}$, $c_{\text{в.п}}$ – средние удельные изобарные теплоемкости сухих газов и водяного пара; x_{Γ} – влагосодержание продуктов сгорания; r_0 – теплота конденсации водяного пара при нормальных условиях.

Тепловые потоки с продуктами сгорания в контрольных точках котла определялись по формуле, кВт

$$Q_{\Gamma} = I_{\Gamma} G_{\text{с.г}} \tag{3}$$

В результате составления теплового баланса котла определялись его КПД и расходы теплоносителя, направляемого на нужды отопления потребителей. КПД котла определялся по уравнению обратного теплового баланса. Доля потерь теплоты с уходящими газами рассчитывалась как отношение теплового потока с продуктами сгорания на выходе из котла к тепловому потоку с продуктами сгорания в топке.

В результате расчета теплообмена в топке были определены суммарное количество теплоты, отдаваемое в жаровой трубе излучением и конвекцией, а также полный коэффициент теплопередачи в топке.

Для определения коэффициента теплопередачи в дымогарных трубах было определено количество теплоты, передаваемое газами, движущимися в дымогарных трубах, воде, протекающей в межтруб-

ном пространстве. Это количество теплоты определялось как разность количества теплоты, полезно используемого в высокотемпературной части, и количества теплоты, отдаваемого газами в жаровой трубе.

Результаты измерений температуры нагреваемой воды на входе в высокотемпературную часть и на выходе из нее, продуктов сгорания на выходе из высокотемпературной части и из котла, а также результаты расчета температуры продуктов сгорания на выходе из топки при различных расходах природного газа приведены в табл. 1.

Кроме того, результаты определения температур продуктов сгорания приведены на рис. 2.

Таблица 1

Значения температур теплоносителей при различных расходах природного газа

Параметр	Величина параметра						
Расход природного газа, м^3/с	11,00	13,00	15,00	15,90	19,63	22,02	23,28
Температура воды на отопление, °С:							
на входе	50	53	58	58	57	61	62
на выходе	70	74	88	87	77	93	92
Температура продуктов сгорания, °С, на выходе из:							
котла	20	22	40	40	35	42	40
высокотемпературной части	177	227	252	279	302	332	336
топки	758	804	841	859	913	942	959

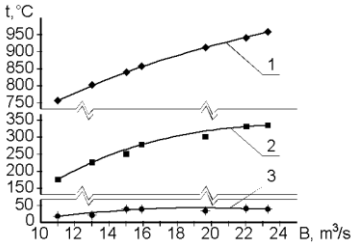

Рис. 2. Значения температур продуктов сгорания в контрольных точках котла:
1 – на выходе из топки; 2 – на выходе из высокотемпературной части; 3 – на выходе из котла

Результаты расчетов, позволяющие оценить изменение значений количества теплоты, передаваемой в единицу времени продуктами сгорания нагреваемой воде в элементах высокотемпературной части котла, а также в высокотемпературной части в целом, при различных расходах природного газа, представлены на рис. 3.

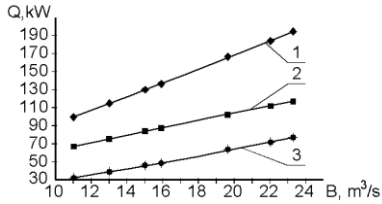

Рис. 3. Количество теплоты, передаваемой от продуктов сгорания нагреваемой воде:
1 – всего в высокотемпературной части котла; 2 – в жаровой трубе; 3 – в дымогарных трубах

Величины коэффициентов теплопередачи в жаровой трубе и в дымогарных трубах при различных значениях расхода природного газа, подаваемого в горелку котла, определенные в результате расчетов, произведенных по приведенной выше методике, представлены на рис. 4.

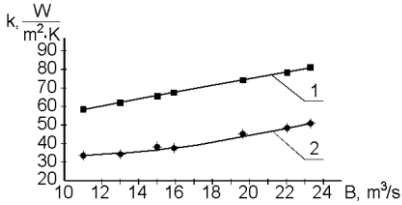

Рис. 4. Коэффициент теплопередачи:
1 – в жаровой трубе; 2 – в дымогарных трубах

Результаты измерений температуры нагреваемой воды на входе в высокотемпературную часть и на выходе из нее показывают, что рассматриваемый котел обеспечивает параметры теплоносителя, необходимые потребителю.

Температура продуктов сгорания на выходе из высокотемпературной части значительно выше температуры уходящих газов традиционных водогрейных котлов [9]. Это обусловливает более высокую разность температур теплоносителей в поверхностях нагрева. Следовательно, при одной и той же производительности поверхности теплообмена в рассматриваемом котле существенно меньше поверхностей нагрева традиционных котлов. Исходя из этого, металлоемкость предлагаемого котла по сравнению с аналогами существенно ниже.

При этом температура продуктов сгорания на выходе из конденсационного водогрейного котла, благодаря глубокому охлаждению газов в его контактно-рекуперативной части, а, следовательно, и потери теплоты с уходящими газами весьма невысоки.

При повышении нагрузки котла от 50 % номинальной до номинальной наблюдается снижение в общем балансе высокотемпературной части котла доли теплоты, отдаваемой газами в жаровой трубе, от 67,3 % до 60,3 % и соответствующий рост доли теплоты, отдаваемой продуктами сгорания в дымогарных трубах.

Значения коэффициентов теплопередачи в элементах высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла сопоставимы с величинами этих коэффициентов в соответствующих поверхностях нагрева водогрейных котлов жаротрубно-дымогарного типа. При этом с увеличением нагрузки котла наблюдается более интенсивный рост коэффициента теплопередачи в дымогарных трубах по сравнению с коэффициентом теплопередачи в жаровой трубе.

Выводы по работе. Обработка результатов экспериментов показала, что значения показателей, характеризующих интенсивность теплопередачи в элементах высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла находятся в тех же пределах, что и значения аналогичных показателей традиционных водогрейных котлов. Однако возможность поддержания более высоких температур газов на выходе из высокотемпературной части по сравнению с температурами уходящих газов традиционных котлов позволяет значительно повысить ее компактность по сравнению с аналогами. Так как теплообмен в контактно-рекуперативной части котла протекает значительно интенсивнее, чем теплообмен в хвостовых поверхностях традиционных котлов, его габариты и металлоемкость существенно меньше аналогов.

Результаты испытаний показали соответствие параметров теплоносителей, вырабатываемых в конденсационном водогрейном котле, требованиям нормативов. Все вышеизложенное дает основания счи-

тать, что использование предлагаемого котла в качестве теплогенератора в автономных системах теплоснабжения весьма перспективно.

Библиографический список

1. Modelling decentralized heat supply: An application and methodological extension in TIMES / E. Merkel, D. Fehrenbach, R. McKenna, W. Fichtner // Energy. 2014. № 73. P. 592-605.

2. Marchenko O., Solomin S. Economic efficiency of renewable sources in autonomous energy systems in Russia // International Journal of Renewable Energy Research. 2014. № 4(3). P. 548-554.

3. Лихтер Ю.М., Константинов В.А. Автономное теплоснабжение зданий // Энергетик. 1995. № 4. С. 9-10.

4. Бычихин С.А., Свирин М.В., Трубаев П.А. Оценка энергосберегающего эффекта при установке автоматизированных тепловых пунктов в образовательных учреждениях // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С.129-133.

5. Independent heating modules with condensing hot water boilers as heat generators as an effective alternative to centralized heat supply / V.P. Kozhevnikov, V.A. Kuznetsov, A.A. Mochalin, R.Y. Titarenko, L.V. Sokolova // Advances in Environmental Biology. 2014. № 8(13). P. 89-93.

6. Перспективы развития рынка конденсационных котлов в России / Г.П. Гриненко, В.П. Кожевников, М.И. Кулешов, А.А. Погонин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 145-149.

7. Губарев А.В., Лозовой Н.М. Конструкция и варианты модернизации конденсационного водогрейного котла// Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С.23-30.

8. Стенд и некоторые результаты испытаний топливосберегающего конденсационного водогрейного котла / В.П. Кожевников, М.И. Кулешов, А.В. Губарев, П.А. Трубаев, А.А. Погонин, А.А. Мочалин, М.О. Фейгельман // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 182-184.

9. Study on thermal efficiency of gas-fired vacuum hot water boiler with installing flue gas condensing waste-heat exchanger / Zh. Pan, J. Niu, Ch. Lu, Z. Zhang, J. Zhu // 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Chengdu: IEEE, 2010. 11495956.