

УДК 697.322

АРТАМОНОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук,
p.artamonovv@yandex.ru
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОТРУБНЫХ КОТЛОВ

Представлен результат сбора и статистической обработки данных о параметрах более 240 моделей современных газотрубных котлов двух- и трехходовой конструкции с тепловой мощностью в диапазоне от 250 до 6000 кВт. По результатам регрессионного анализа получена система уравнений, которая является параметрической моделью современных газотрубных котлов. Проведено сравнение двух- и трехходовых котлов, численно показаны отличия данных конструкций при равной тепловой мощности.

Ключевые слова: котел; газотрубный котел; параметры современного котла.

PAVEL A. ARTAMONOV, PhD,
p.artamonovv@yandex.ru
Tyumen State Oil and Gas University,
38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen', Russia

PARAMETRIC MODEL OF MODERN GAS-TUBE BOILERS

The paper presents the results of the data collection and statistical processing in relation to the parameters of more than 240 models of modern gas-tube boilers having a two- and a three-way configuration with thermal capacity ranging from 250 to 6000 kW. Using the results of the regression analysis, the derived system of equations is a parametric model of modern gas-tube boilers. A comparison of two- and a three-way configurations of gas-tube boilers shows their difference at equal thermal capacity.

Keywords: boiler; gas-tube boiler; modern boiler parameters.

С развитием технологий производства, разработкой новых методов проектирования и принципов утилизации энергоресурсов наблюдается устойчивая тенденция к получению большего эффекта от оборудования меньшего габаритного размера. Эта закономерность прослеживается и в области теплоэнергетики [1]. В статье представлена аналитическая модель современного газотрубного котла, полученная по результатам анализа рынка европейских и отечественных производителей современных котлов. Данные закономерности обладают большой практической ценностью как для компаний, занимающихся проектированием котлов, так и для проектных организаций, проектирующих источники тепла.

Стоит отметить, что именно современные газотрубные котлы позволяют размещать высокие установленные тепловые мощности в малых объемах [2, 3]. Автор статьи [4] проводит обширный сравнительный анализ котлов разной конструкции, выделяя основные преимущества современных газотрубных котлов:

- компактность: низкие габариты и удельный вес, что позволяет применять их в стесненных условиях;
- надежность конструкции, простота обслуживания горелок и очистки трубных пучков;
- быстрое время перехода с малой на большую тепловую мощность, что позволяет реализовывать высокую точность управления при автоматизации процесса выработки тепла;
- газоплотность и герметичность камеры сгорания дает возможность применять одну дутьевую горелку: котлы не нуждаются в дымососах;
- по трудозатратам изготовление газотрубного котла дешевле водотрубного на 10–15 %.

В частном случае, когда производитель котла известен, возможно воспользоваться каталогами заводов-изготовителей. Однако большую практическую ценность (например, при составлении технического задания или технико-экономического обоснования) представляет собой наличие универсальной модели, которая позволит оценить основные параметры котла, исходя из номинальной тепловой мощности, без привязки к конкретному производителю.

Введем следующие обозначения:

- a – длина котла, мм;
- b – ширина котла, мм;
- h – высота котла, мм;
- m – масса котла, кг;
- V – водяной объем котла, л;
- y – аэродинамическое сопротивление, мбар;
- Q_k – номинальная тепловая мощность котла, кВт.

Тогда математическая модель, описывающая котел в зависимости от его тепловой мощности, запишется системой уравнений

$$\begin{cases} a = f(Q_k), \\ b = f(Q_k), \\ h = f(Q_k), \\ m = f(Q_k), \\ V = f(Q_k), \\ y = f(Q_k). \end{cases} \quad (1)$$

Благодаря высокой рыночной конкуренции, конструкции современных жаротрубных котлов приближены друг к другу, что позволяет провести статистическую обработку технических параметров и по результатам регрессионного анализа найти зависимости, с помощью которых можно решить систему уравнений (1) относительно заданного значения Q_k .

Для получения универсальной модели был проведен сбор параметров более 240 моделей двух- и трехходовых котлов, работающих на жидком и газообразном топливе, с номинальной тепловой мощностью в диапазоне от 250 до 6000 кВт. Диапазон выборки (250–6000 кВт) по классификации котлов, приведенной в работе [5] и в других русскоязычных источниках, относится

к котлам малой и средней мощности. Компания Viessmann предлагает другую классификацию для современных водогрейных котлов [6]:

- малой мощности от 4 до 65 кВт;
- средней мощности от 72 до 1750 кВт;
- большой мощности от 1860 до 15000 кВт.

Согласно данной классификации выбранный мощностной диапазон характеризует котлы средней и малой мощности. Вместе с этим именно котлы данного мощностного диапазона устанавливаются в 72 % котельных в Российской Федерации [7].

После проведения анализа рынка котлов выбранный мощностной диапазон был разделен на группы, соответствующие мощностям: 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 кВт. Для каждой группы была сделана выборка не менее 10 моделей различных производителей двухходовых и не менее 10 моделей трехходовых котлов. В выборке участвовали следующие производители: *Buderus, Viessman, Wolf, ICI, Unical, Riello, Protherm, SIME, DAKON, Chappee, Ecoflam, REX, ALFA, Byworth, BIASI, De Dietrich, Eren san, LAVART, IVAR, «МАКСТЕРМ» «Тюмень-Дизель», ЗИОСАБ, «Энтроросс», «Ремекс».*

Для определения зависимости параметров современных газотрубных котлов от их номинальной тепловой мощности была проведена статистическая обработка данных во всех диапазонах мощностей. Для каждой группы были определены следующие статистические параметры: минимальное, максимальное и среднее значение по выборке, стандартное отклонение, стандартное отклонение среднего, коэффициент Стьюдента, доверительный интервал, значение относительной ошибки.

Статистические параметры находились в программе *Microsoft Excel*. Пусть рассматриваемый параметр в каждой выборке будет обозначен как $x_1, x_2, \dots, x_n$, тогда среднее значение по выборке определяется по уравнению

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2)$$

Стандартное отклонение как оценка среднеквадратического отклонения случайной величины x относительно ее математического ожидания было найдено согласно уравнению

$$S = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где σ^2 – дисперсия; n – объем выборки.

Стандартное отклонение среднего определено по формуле

$$S_{cp} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Коэффициент Стьюдента t , используемый для нахождения доверительного интервала, находился с помощью функции «=СТЮДРАСПОБР (...)» программного комплекса *Microsoft Excel* со значением доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и степенью свободы $n - 1$.

При этом доверительный интервал (ДИ) принимается как произведение коэффициента Стьюдента и стандартного отклонения среднего

$$\text{ДИ} = t \cdot S_{\text{ср}}. \quad (5)$$

Значение относительной ошибки δ определяем по уравнению

$$\delta = \frac{\text{ДИ}}{\bar{x}_n}. \quad (6)$$

По результатам статистической обработки данных получены таблицы характерных параметров двух- и трехходовых жаротрубных котлов в диапазоне мощностей от 250 до 6000 кВт. Значение верхней границы интервала является результатом сложения математического ожидания и доверительного интервала. С целью создания универсальных зависимостей для газотрубных котлов принимаем за характерный параметр большее значение из выборки двух- и трехходовых котлов ($\max(\bar{x}_n + \text{ДИ})$). На рис. 1–6 данные значения показаны круглым маркером, полученные регрессионные кривые обозначены сплошной линией, а уравнение регрессии записано с индексом max.

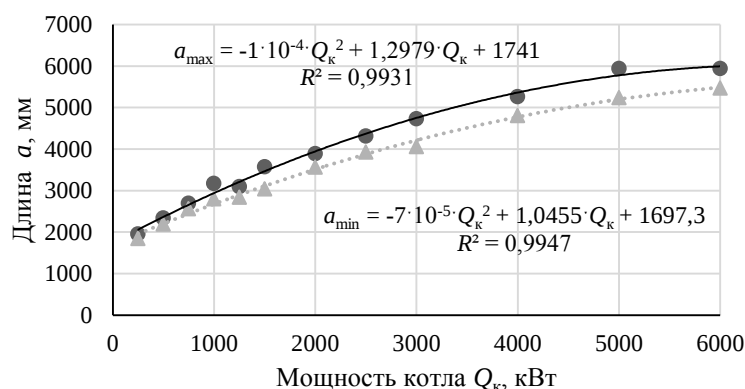


Рис. 1. Зависимость длины газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

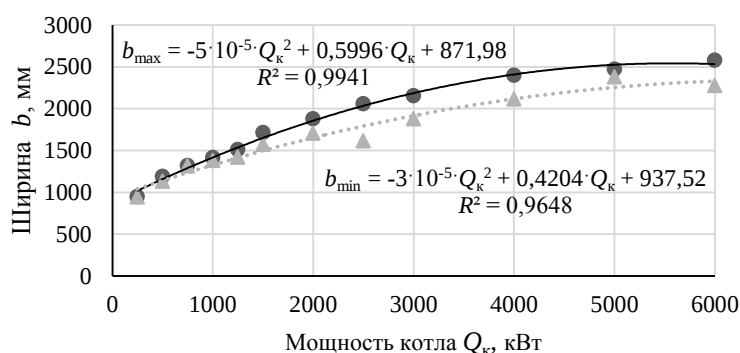


Рис. 2. Зависимость ширины газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

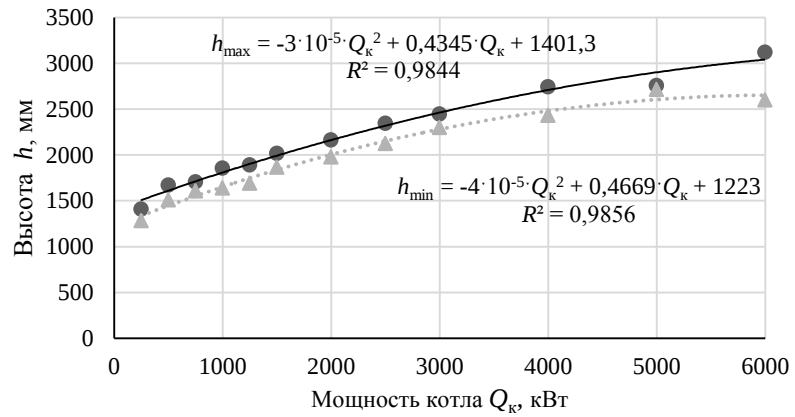


Рис. 3. Зависимость высоты газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

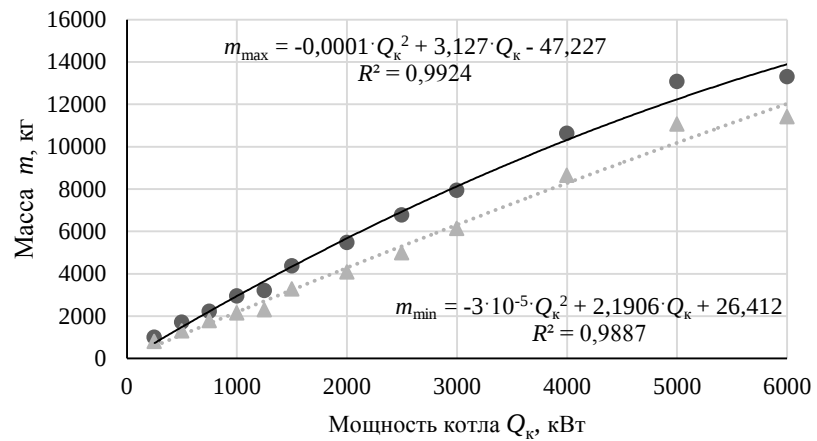


Рис. 4. Зависимость массы газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

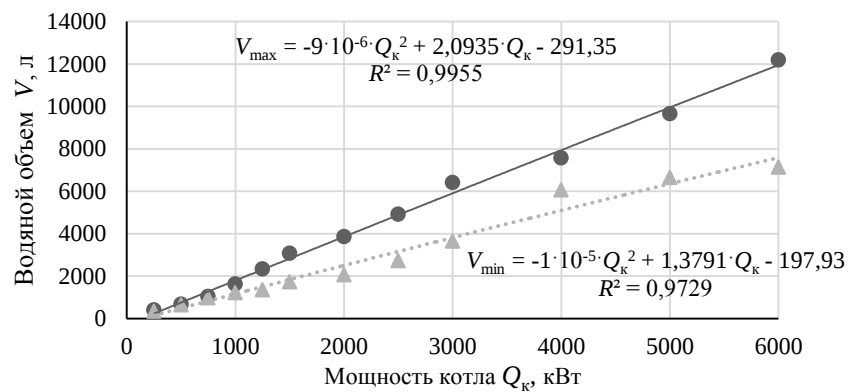


Рис. 5. Зависимость водяного объема газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

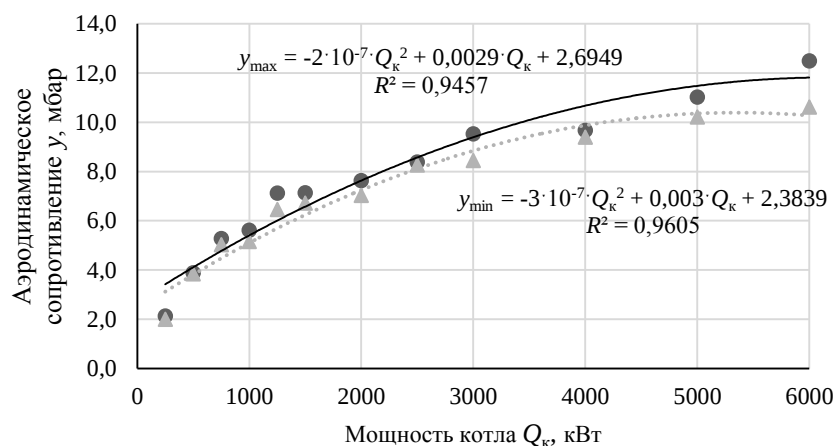


Рис. 6. Зависимость аэродинамического сопротивления газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

В сравнении с аналогичными данными, представленными в работе [8], рис. 1–6 содержат скорректированные уравнения регрессии, по которым полученные значения характеризуются меньшей относительной ошибкой.

Для каждого уравнения вычислена величина достоверности аппроксимации R^2 [9]. Проанализировав данные рисунки, можно сделать вывод, что представленные зависимости с высокой степенью точности описывают параметрическую модель современного газотрубного котла.

Используемая вероятность (0,95), а также выбор значения параметра по верхней границе доверительного интервала создает условия, которым должны отвечать параметры рассматриваемых типов котлов. Фактически, если параметры котла меньше или равны значениям, найденным по представленным уравнениям, это значит, что котел удовлетворяет современным стандартам котлостроения и является конкурентоспособным. Если параметры котла выше данных значений, то котел является неконкурентоспособным, и конструкция котла требует доработки.

Рассмотренная постановка задачи при получении уравнений регрессии создает условия, при которых данные зависимости описывают укрупненные показатели современных газотрубных котлов. Большой интерес представляют и уравнения, позволяющие оценить не только верхний предел рассматриваемых параметров, но и их минимальные значения. Для нахождения нижнего предела параметров современных газотрубных котлов будем использовать минимальное значение разности математического ожидания и доверительного интервала по выборке ($\min(\bar{x}_n - \text{ДИ})$). Результат регрессионного анализа показан на рис. 1–6 (пунктирная линия), а уравнение регрессии записано с индексом min.

На основании обработанного массива данных проведем сравнительную оценку технико-экономических показателей конструкций двух- и трехходовых котлов равной тепловой мощности. Для этого будут использованы средние значения по выборкам. Одним из главных параметров, определяющих

стоимость котла, является его удельная металлоемкость, выраженная в единице массы на единицу тепловой мощности котла (кг/кВт). Фактически этот критерий показывает, какое количество металла требуется для изготовления котла определенной тепловой мощности. Данная характеристика является показателем не только затрат на материал, но и косвенно характеризует трудоемкость процесса сборки. Результат регрессионного анализа средней удельной металлоемкости двух- и трехходовых котлов представлен на рис. 7.

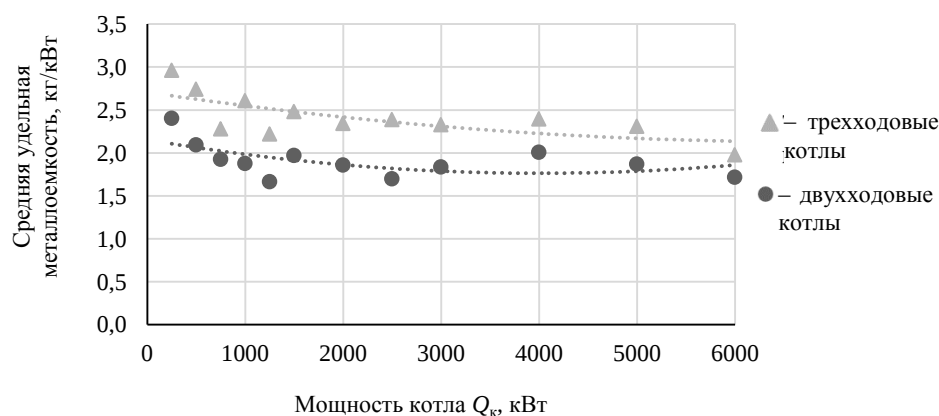


Рис. 7. Зависимость средней удельной металлоемкости газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

Как видно из полученного графика, металлоемкость двухходовых котлов при равной тепловой мощности ниже металлоемкости трехходовых: разница между металлоемкостями составляет от 0,26 до 0,73 кг/кВт. То есть суммарная стоимость производства трехходовых котлов выше во всех мощностных диапазонах.

Еще одним важным критерием является сопротивление газового тракта котла, или аэродинамическое сопротивление. Его фактическое значение оказывает влияние на положение рабочей точки горелки [10]. Для котлов одинаковой тепловой мощности, но с разным сопротивлением газового тракта режим работы вентилятора при частотном регулировании электромотора будет разный, а значит, электропотребление и, как следствие, эксплуатационные затраты также будут разными. Результат регрессионного анализа зависимости среднего аэродинамического сопротивления от тепловой мощности двух- и трехходовых котлов представлен на рис. 8.

Из графика видно, что значительное различие в аэродинамическом сопротивлении котлов разной конструкции наблюдается только в диапазоне мощностей от 5000 до 6000 кВт. Это значит, что в диапазоне мощностей от 250 до 5000 кВт эксплуатационные затраты, связанные с энергопотреблением горелки, можно считать условно одинаковыми для двух- и трехходовых котлов.

Еще одним параметром работы котла является водяной объем. Результат регрессионного анализа зависимости среднего водяного объема котла от тепловой мощности двух- и трехходовых котлов представлен на рис. 9.

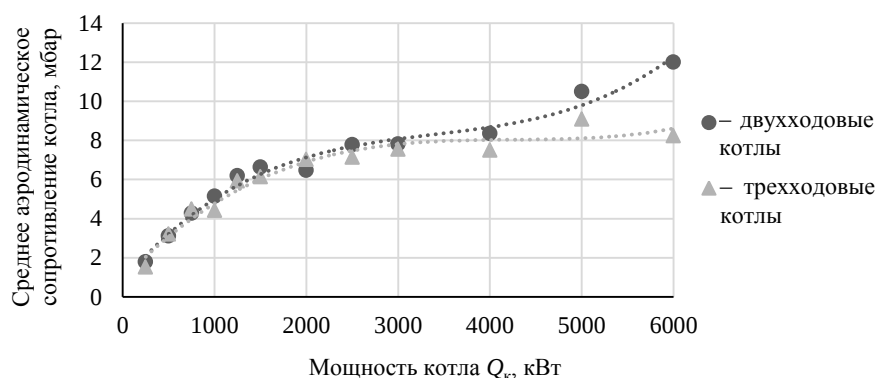


Рис. 8. Зависимость среднего аэродинамического сопротивления газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

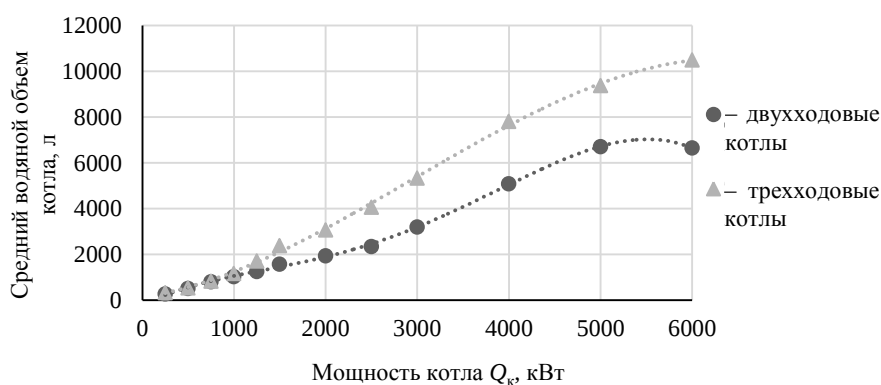


Рис. 9. Зависимость среднего водяного объема газотрубных котлов от номинальной тепловой мощности

С увеличением тепловой мощности разница между средними водяными объемами котлов трехходовой и двухходовой конструкции растет от 34,3 до 3845 л. В общем случае увеличение водяного объема повышает нагрузки на фундамент котла, ведет к удорожанию системы компенсации температурных расширений (увеличивается объем баков экспанзоматов) и повышает тепловую инерцию котлового контура при независимой системе теплоснабжения.

Рис. 7–9 демонстрируют определенную степень преимущества конструкции двухходового котла. Несмотря на это, данный тип имеет ограничения по используемому топливу из-за наличия реверсивной топки: большинство производителей двухходовых котлов не допускают использования нефти и мазута в качестве топлива. Трехходовые котлы такого ограничения не имеют.

Таким образом, повышение требований к энергосбережению заставляет менять подходы к практике проектирования и задействовать более сложные алгоритмы расчетов. В настоящей статье была разработана математическая модель, описывающая зависимость параметров современных газотрубных

котлов от их тепловой мощности. Данная модель не только дает возможность осуществить проектирование источников теплоснабжения, провести технико-экономическое обоснование без привязки к конкретному производителю, но и создает дополнительный инструмент для оптимизации конструкций современных газотрубных котлов. На основании полученных данных проведено сравнение основных технико-экономических показателей котлов двух- и трех-ходовой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новикова, Э.Э. Тепловой расчет топки газотрубного котла / Э.Э. Новикова, А.Г. Михайлов // Новая наука: современное состояние и пути развития. – 2016. – № 10-2. – С. 194–197.
2. Куриленко, Н.И. Организация воздушных потоков для повышения эффективности работы блочных автоматизированных котельных / Н.И. Куриленко, Л.Ю. Михайлова, П.А. Артамонов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 171–178.
3. Параметры эффективной работы дефлекторов в блочных автоматизированных котельных / Н.И. Куриленко, Л.Ю. Михайлова, Е.Ю. Куриленко, П.А. Артамонов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 4. – С. 171–178.
4. Каспаров, С.Г. Особенности современных жаротрубных котлов для отопительных систем / С.Г. Каспаров. – Харьков : Самиздат, 2010. – 29 с.
5. Палей, Е.Л. Проектирование котельных в секторе ЖКХ. Справочное практическое пособие / Е.Л. Палей. – СПб. : Газовый клуб, 2006. – 172 с.
6. Миrowsки, А. Материалы для проектирования котельных и современных систем отопления / А. Миrowsки, Г. Ланге, И. Елень. – Польша : Виссманн, 2005. – 293 с.
7. Бочкарев, В.А. Анализ влияния качества топлива на экологические показатели котельных агрегатов малой мощности в Иркутской области / В.А. Бочкарев, А. В. Бочкарева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 11. – С. 119–126.
8. Артамонов, П.А. Повышение эффективности работы котлоагрегатов стабилизацией воздушно-теплого режима блочно-модульных котельных : дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2016. – 155 с.
9. Лоран, П.Ж. Аппроксимация и оптимизация / П.Ж. Лоран. – М. : Мир, 1975. – С. 496.
10. Технический каталог 2015 CibUnigas. Моноблочные горелки. – 187 с. – Условия доступа : <http://www.cibunigas.com/>

REFERENCES

1. Novikova E.E., Mikhaylov A.G. Teplovoy raschet topki gazotrubnogo kotla [Thermal analysis of gas-tube boiler]. *Novaya nauka: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya*. 2016. No. 10-2. Pp. 194–197. (rus)
2. Kurilenko N.I., Artamonov P.A., Mikhailova L.Yu. Organizatsiya vozduzhnykh potokov dlya povysheniya effektivnosti raboty blochnykh avtomatizirovannykh kotel'nykh [United air flow to improve performance of block automated boiler]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 4. Pp. 171–178. (rus).
3. Kurilenko N.I., Artamonov P.A., Mikhailova L.Yu. Parametry effektivnoi raboty deflektorov v blochnykh avtomatizirovannykh kotel'nykh [Performance parameters of deflectors in modular boiler houses]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 4. Pp. 171–178. (rus).
4. Kasparov S.G. Osobennosti sovremennykh zharotrubnykh kotlov dlya otopitel'nykh sistem [Modern gas-tube boilers for heating systems]. Kharkiv: Samizdat Publ., 2010. 29 p. (rus)

5. *Paley E.L.* Proektirovanie kotel'nykh v sektore ZhKKh. Spravochnoe prakticheskoe posobie [Design of boiler houses in housing sector. Reference practical guide]. St.-Petersburg: Gas Club, 2006. 172 p. (rus)
6. *Mirowski A., Lange G., Elen' I.* Materialy dlya proektirovaniya kotel'nykh i sovremennykh sistem otopeniya [Materials for design of modern boiler stations and heating systems]. Poland: Viessmann Publ., 2005. 293 p. (rus)
7. *Bochkarev V.A., Bochkareva A.V.* Analiz vliyaniya kachestva topliva na ekologicheskie pokazateli kotel'nykh agregatov maloy moshchnosti v irkutskoy oblasti [Fuel quality and environmental performance of boilers of small capacity in the Irkutsk Region]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No. 11. Pp. 119–126. (rus)
8. *Artamonov P.A.* Povyshenie effektivnosti raboty kotloagregatov stabilizatsiei vozdušno-teplovogo rezhima blochno-modul'nykh kotel'nykh : dis. ... kand. tekhn. nauk [Efficiency improvement of boiler operation through stabilization of air-heat mode. PhD Thesis]. Tyumen, 2016. 155 p. (rus)
9. *Laurent P.-J.* Approssimatsiya i optimizatsiya [Approximation et optimisation]. Moscow: Mir Publ., 1975. P. 496. (transl. from Fr.)
10. *Tekhnicheskij katalog 2015 CibUnigas.* Monoblochnye gorelki [Technical catalog 2015. CibUnigas. Single-block burners]. Available at: [www. cibunigas. com/](http://www.cibunigas.com/) (rus)