

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ОПЫТ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ СМЕСИ БУРЫХ УГЛЕЙ НА ЖЕЛЕЗНОГОРСКОЙ ТЭЦ

© 2022 г. А. В. Жуйков^{a, *}, А. И. Карловский^b, А. И. Матюшенко^a,
П. Ю. Гребеньков^c, С. Г. Козлов^{c, **}, М. Н. Выхристюк^c, Д. А. Логинов^d

^aСибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 79, г. Красноярск, 660041 Россия

^bКрасноярская региональная энергетическая компания (АО «КрасЭКО»),
просп. Мира, д. 10, г. Красноярск, 660049 Россия

^cООО «СибВТИ», Свободный просп., д. 68/2, оф. 5, г. Красноярск, 660041 Россия

^dООО «Сибниуголеобогащение», ул. Ады Лебедевой, д. 64а, г. Красноярск, 660060 Россия

*e-mail: azhuikov@sfu-kras.ru

**e-mail: kozlovsg@sibvti.org

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 10.08.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Цель исследований, результаты которых представлены в данной статье, — оценка технико-экономических и экологических показателей при длительной работе четырех котлов БКЗ-160-1.4-5 на непроектном топливе, состоящем на 50% из бурого бородинского угля марки 2БР (с низшей теплотой сгорания $Q^r = 11.3–16.3$ МДж/кг) и на 50% из бурого большесырского угля марки 3БР ($Q^r = 19.3–20.1$ МДж/кг) Канско-Ачинского бассейна. Система топливоподачи на такой смеси отработала штатно. При применении водяной обдувки проблем со шлакованием топочных экранов котлов не зафиксировано. Повышение теплоты сгорания смеси углей и КПД брутто котлов позволило уменьшить общий расход топлива на ТЭЦ. В результате снижения потерь тепла с уходящими газами коэффициент полезного действия котлов при работе на смеси по отчетным данным ТЭЦ увеличился на 0.4%. Валовые выбросы оксидов азота остались на прежнем уровне, а выбросы диоксида серы из-за повышенного содержания серы в смеси топлив возросли на 40.6 т/мес (14.4%). Снижение содержания золы в топливной смеси привело к сокращению валовых выбросов твердых частиц в атмосферу на 15.1 т/мес (25.2%), золошлаковых отходов — на 1166 т/мес (25.3%).

Ключевые слова: котел, бурый уголь, топливная смесь, теплота сгорания, факельное сжигание, КПД брутто, зола, выбросы вредных веществ, шлакование поверхностей нагрева

DOI: 10.1134/S0040363622040099

Цель настоящих исследований заключалась в проведении сравнительного анализа основных технико-экономических и экологических показателей работы Железногорской ТЭЦ (ЖТЭЦ) на проектном топливе (бородинский бурый уголь марки 2БР) и на смеси топлив (50% по массе — бородинский уголь марки 2БР, 50% — большесырский уголь марки 3БР) за длительный период эксплуатации. Анализ проводился с использованием отчетных данных ЖТЭЦ.

Железногорская ТЭЦ расположена в г. Сосновоборск Красноярского края и в настоящее время работает в режиме котельной. Основное оборудование на ЖТЭЦ — четыре паровых котла марки БКЗ-160-1.4-5 с твердым шлакоудалением, ко-

торые имеют следующие технические характеристики:

Паропроизводительность, т/ч	160.0
Теплопроизводительность, МВт	111.0
Температура, °С:	
перегретого пара	250
питательной воды	104
уходящих газов	155
Давление, МПа:	
перегретого пара	1.4
питательной воды	2.0
КПД брутто, %	91.9

Таблица 1. Характеристики угольных топлив и их смесей

Характеристика	Топливо			
	бородинский уголь	большесырский уголь	30% большесырского и 70% бородинского угля	50% большесырского и 50% бородинского угля
Влажность W^r , %	32.1	24.9	30.0	27.5
Зольность A^r , %	6.7	5.3	5.9	5.6
Содержание серы S^r , %	0.2	0.3	0.2	0.3
Теплота сгорания низшая Q_i^r , МДж/кг	16.33	19.26	17.42	18.30

Проектным топливом является бородинский бурый уголь марки 2БР. Для его размолва котлы БКЗ-160-1.4-5 оборудованы четырьмя пылесистемами прямого вдувания с мельницами-вентиляторами типа МВ 1600/400/980 с газовой сушкой топлива. Топливо из бункера сырого угля скребковыми питателями ПС-700/9000 и ПС-700/21000 производительностью 16 т/ч подается в мельницы-вентиляторы. Управление данным процессом осуществляется изменением частоты электродвигателя, а также регулированием толщины слоя топлива (по месту). Рекомендуемая тонина помола (расчетная $R_{90} = 57\%$) достигается установкой лопаток сепаратора МВ в определенное положение. После сепаратора пылеугольная аэросмесь поступает в пыледелитель, из которого по пылепроводам подается в горелочные устройства.

Для сушки угля используются горячие топочные газы, отбираемые из верхней части топки, и холодные дымовые газы, отбираемые за дымососом. Температура сушильного агента регулируется изменением соотношения количества топочных и холодных дымовых газов, подаваемых на сушку топлива. Для забора уходящих дымовых газов установлен дымосос рециркуляции газов типа ДН-15БК.

Восемь пылеугольных горелок расположены по тангенциальной схеме в углах топки в два яруса. На скатах холодной воронки, в нижней части топки котла, установлены семь сопел нижнего дутья по встречно-смещенной схеме. Они предназначены для снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания, предотвращения шлакования холодной воронки и уменьшения потери тепла от механической неполноты сгорания. Система очистки поверхностей нагрева котла от золошлаковых отложений состоит из аппаратов водяной обду-

ки топки, паровой обдувки и дробевой очистки конвективных поверхностей нагрева.

Котел оборудован дутьевым вентилятором типа ВДН-18К и дымососом типа ДН-22×2-062К. Очистка дымовых газов от твердых частиц золы осуществляется электрофильтром типа ЭГВ2-30-9-6-3.

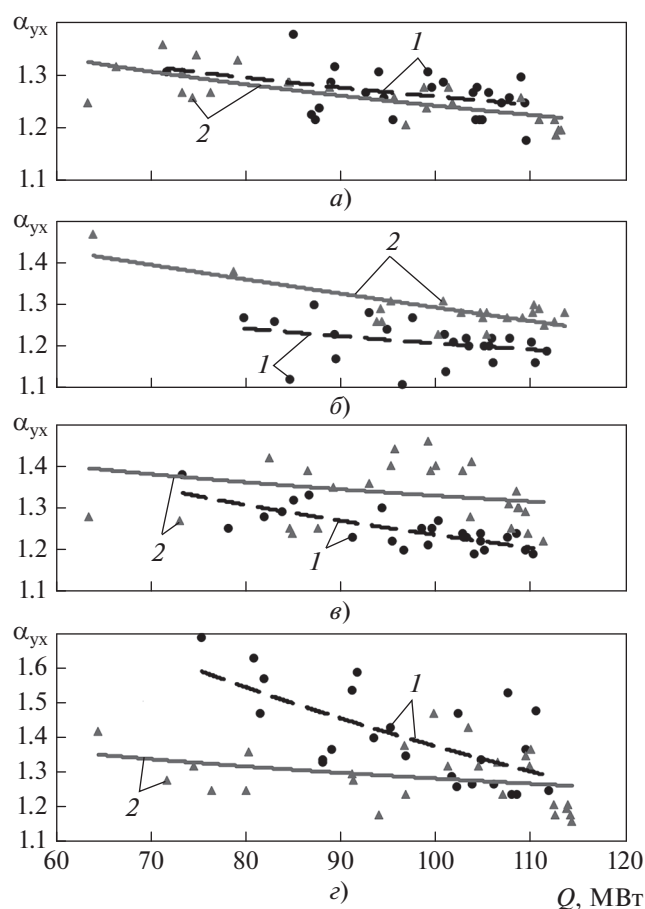
В 2016 г. на Железнодорожной ТЭЦ было проведено опытное сжигание смесей углей [1]. В качестве добавочного топлива использовался бурый уголь 3БР разреза “Большесырский” Канско-Ачинского бассейна. Характеристики топлива, использованного во время испытаний, приведены в табл. 1. Большесырский уголь сжигался в чистом виде, а также в смеси с бородинским углем в процентном соотношении по массе 30/70 и 50/50. Угольный склад ЖТЭЦ позволял организовать раздельное хранение углей разных марок. Тракт топливоподачи обеспечивал надежное конвейерное смешение большесырского и бородинского углей и подачу этой смеси к котлам.

Сжигание большесырского угля в чистом виде сопровождалось более интенсивным шлакованием топочных экранов по сравнению со сжиганием его в смеси с бородинским углем. Кроме того, при сжигании угля повышенной калорийности для регулирования температуры сушильного агента в оголовках газозаборных шахт пришлось вводить слабopодогретый воздух из-за недостатка расхода низкотемпературных газов рециркуляции при работе котла на трех пылесистемах.

По результатам опытов рекомендовалось сжигать смесь большесырского и бородинского углей в процентном соотношении по массе 50/50. Были отмечены преимущества сжигания такой смеси по сравнению с проектным бородинским углем: повышение КПД брутто котла на 0.7–1.2%, снижение общего расхода топлива, расширение регулировочного диапазона нагрузок кот-

Таблица 2. Характеристики бородинского угля и его смеси с большесырским углем

Характеристика	Бородинский уголь	Смесь углей (50/50%)
Влажность W^r , %	31.3	28.4
Приведенная влага $W^п$, 4.19×10^5 кг/кДж	7.95	6.58
Зольность A^r , %	7.1	5.8
Приведенная зольность $A^п$, 4.19×10^5 кг/кДж	1.80	1.34
Содержание серы S^r , %	0.23	0.29
Приведенное содержание серы $S^п$, 4.19×10^5 кг/кДж	0.058	0.067
Содержание азота N^r , %	0.56	0.57
Приведенное содержание азота $N^п$, 4.19×10^5 кг/кДж	0.143	0.133
Теплота сгорания низшая Q_i^r , МДж/кг	16.49	18.08

**Рис. 1.** Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах котлов № 1–4 (а–г) при сжигании топливной смеси и бородинского угля.

1 – сжигание бородинского угля в декабре 2019 г.; 2 – сжигание смеси бородинского и большесырского углей в январе 2020 г.

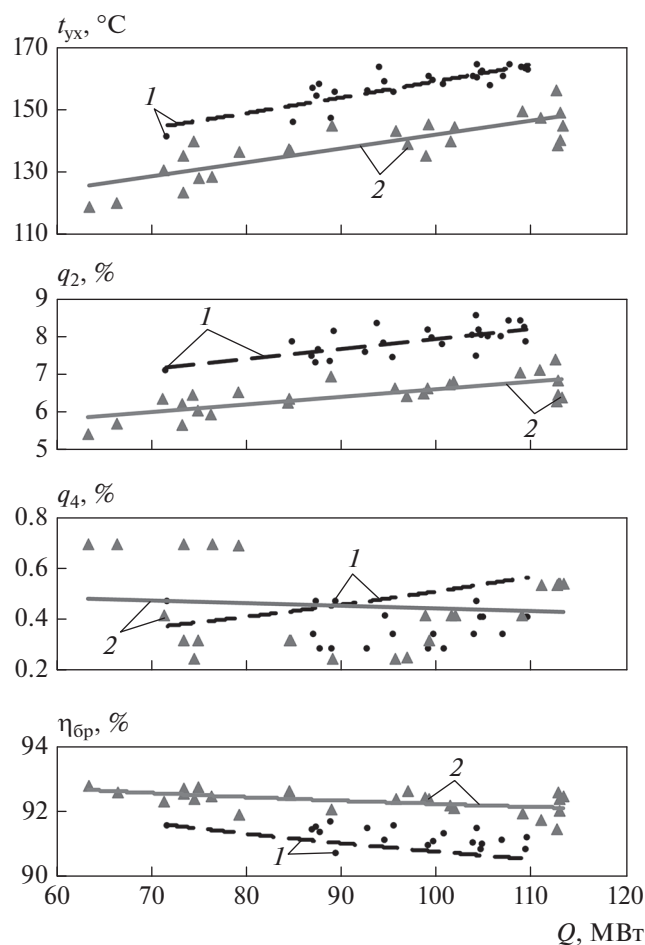


Рис. 2. Техничко-экономические показатели работы котла № 1 на бородинском угле и смеси бородинского и большесырского углей.

1 – сжигание бородинского угля в декабре 2019 г.; 2 – сжигание смеси бородинского и большесырского углей в январе 2020 г.

ла при работе двух пылесистем, сокращение выбросов в атмосферу золы и уменьшение объема золошлаковых отходов.

В начале 2020 г. ЖТЭЦ полностью перешла на сжигание смеси большесырского и бородинского углей в пропорции 50/50% по массе (далее смесь). Для борьбы со шлакованием топочных экранов к двум существующим аппаратам водяной обдувки топки дополнительно было установлено еще два. Это позволило обеспечить надежную работу топочных экранов по условиям шлакования.

В процессе эксплуатации система аспирации топливоподачи и пылеподавления в узлах пере-сыпки работали штатно. Проблем с подачей и проходом по тракту топливоподачи непроектного большесырского угля и его смеси с бородинским углем не возникало. Случаев возгорания укатанного послойно штабеля большесырского угля не наблюдалось.

Для сравнения эксплуатационных показателей работы котлов ЖТЭЦ при сжигании бородинского угля и смеси были выбраны два периода – декабрь 2019 г. и январь 2020 г. Средневзвешенные значения влажности, зольности, содержания серы и азота, низшей теплоты сгорания данных видов топлива по отчетным данным ЖТЭЦ за указанные периоды представлены в табл. 2. В декабре 2019 г. за 26 сут четырьмя котлами было сожжено 54381.7 т бородинского угля, выработано 814036 ГДж тепловой энергии, средняя тепловая нагрузка котлов при этом составила $Q_{ср} = 98$ МВт. За 26 сут в январе 2020 г. четырьмя котлами было сожжено 50775.5 т смеси, выработано 837410 ГДж тепловой энергии, средняя тепловая нагрузка котлов составила $Q_{ср} = 96.8$ МВт.

Воздушные режимы работы котла № 1 на бородинском угле и смеси практически одинаковы (рис. 1). Анализ зависимости номинального зна-

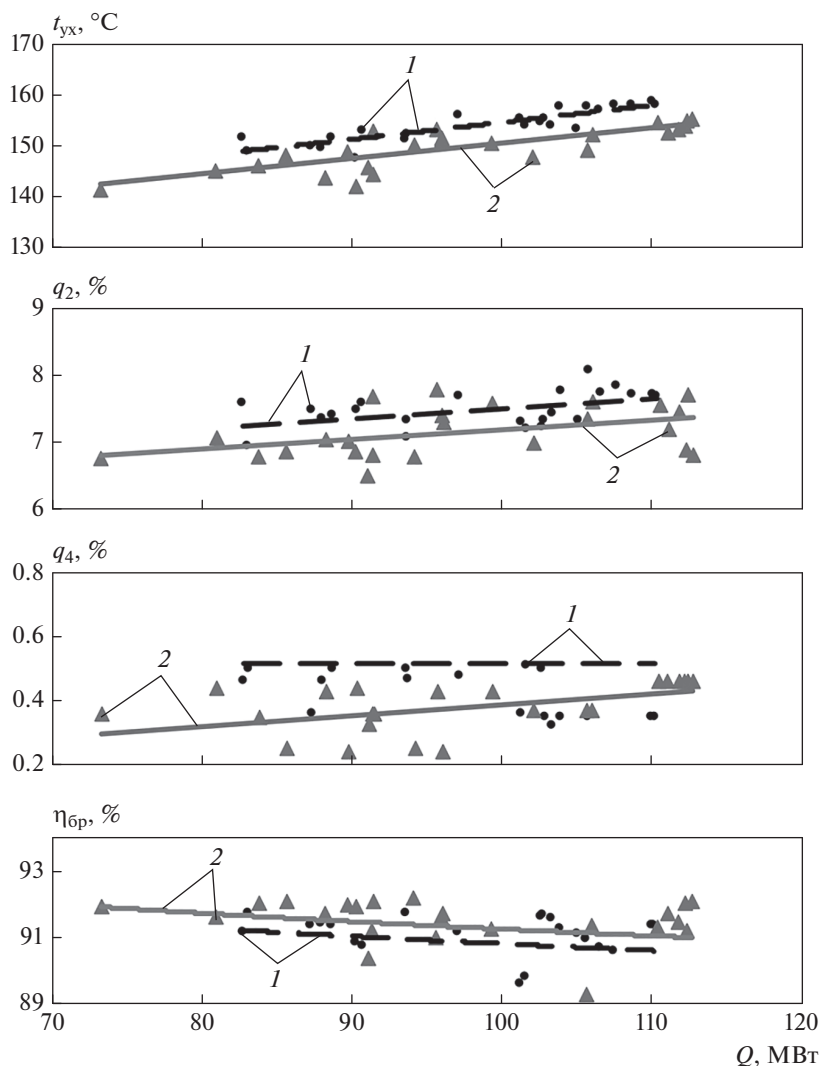


Рис. 3. Техничко-экономические показатели работы группы котлов (№ 1–4) на бородинском угле и смеси его с большесырским.

1 – сжигание бородинского угля в декабре 2019 г.; 2 – сжигание смеси бородинского и большесырского углей в январе 2020 г.

чения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах (α_{yx}) от нагрузки котлов (Q) показал, что коэффициенты избытка воздуха котлов № 2–4 при сжигании бородинского угля и смеси существенно различаются, поэтому сопоставление технико-экономических показателей в условиях штатной эксплуатации на обоих видах топлива целесообразно провести на примере котла № 1 и в целом по группе котлов № 1–4.

Из рис. 2 видно, что температура уходящих газов (t_{yx}) котла № 1 при сжигании смеси на 15–18°C ниже по сравнению с таковой при сжигании бородинского угля, а потери тепла с уходящими газами (q_2) меньше на 1.1–1.3%. Сокращение потерь тепла с уходящими газами при работе котла на смеси обусловлено уменьшением температуры

уходящих газов из-за более низкой приведенной влаги угольной смеси. Потери тепла от механической неполноты сгорания (q_4) не имеют существенных различий для обоих видов топлива. КПД brutto ($\eta_{бр}$) котла № 1 при работе на смеси на 1.2–1.6% выше, чем на бородинском угле, что соответствует результатам, полученным в период опытного сжигания смесей бородинского и большесырского углей [1].

Авторами данной статьи проводится сравнение показателей работы ТЭЦ в целом при сжигании обоих видов топлива. На рис. 3 приведены показатели работы группы котлов (средневзвешенные по котлам № 1–4) по отчетным данным ЖТЭЦ за декабрь 2019 г. на проектом бородинском угле и за январь 2020 г. на смеси. Качествен-

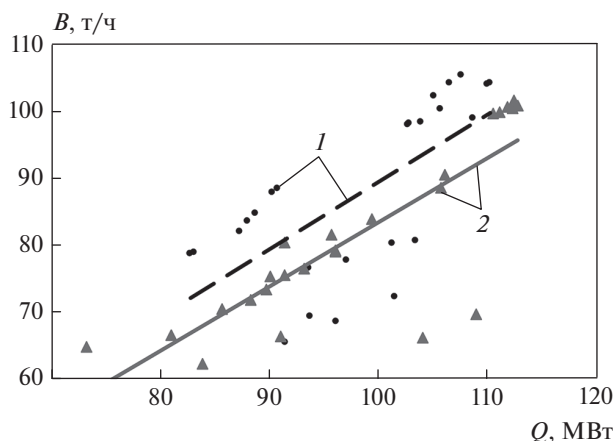


Рис. 4. Часовой расход топлива группой котлов (№ 1—4) при сжигании бородинского угля и смеси его с большеесырским. 1 — сжигание бородинского в декабре 2019 г.; 2 — сжигание смеси бородинского и большеесырского углей в январе 2020 г.

ная картина зависимостей осталась такой же, как для котла № 1 (см. рис. 2). В количественном отношении произошли изменения. Температура уходящих газов при сжигании смеси снизилась всего на 3–4°C, а КПД брутто возрос на 0.4%, что в 3–4 раза меньше, чем на котле № 1. Причина, по мнению авторов данной статьи, заключается в том, что по сравнению с котлом № 1 эксплуатационные режимы котлов № 2–4 при сжигании бородинского угля и смеси существенно различались из-за разных значений коэффициента избытка воздуха (см. рис. 1).

Переход на сжигание смеси углей привел к снижению среднечасового расхода топлива (B) на 5–7 т/ч (рис. 4) из-за увеличения теплоты сгорания смеси на 1.59 МДж/кг и повышения КПД брутто группы котлов. Удельные расходы топлива на выработку тепла составили 66.804 кг/ГДж на бородинском угле и 60.633 кг/ГДж на смеси. При месячной выработке тепловой энергии ЖТЭЦ 963000.0 ГДж/мес разница расходов бородинского угля и смеси составит $(66.804 - 60.633) \times 963000.0 \times 10^{-3} = 5943$ т/мес (9.2%).

Оценка выбросов газообразных загрязняющих веществ, твердых частиц, а также количества золошлаковых отходов выполнялась согласно [2, 3]. При работе на угольной смеси валовые выбросы диоксида серы возросли на 40.6 т/мес (14.4%) вследствие более высокого содержания серы в угольной смеси. Валовые выбросы оксидов азота снизились на 5%: оксида азота на 1.1 т/мес, диоксида азота на 6.6 т/мес. Приведенная зольность смеси топлив в 1.34 раза ниже, чем таковая бородинского угля, в связи с чем валовые выбросы твердых частиц в атмосферу уменьшились на 15.1 т/мес (25.2%), а количество золошлаковых отходов сократилось на 1166 т/мес (25.3%).

ВЫВОДЫ

1. При сжигании смеси бородинского угля марки 2БР и большеесырского угля марки 3БР в процентном соотношении по массе 50/50 наблюдалась надежная работа как систем топливоподачи, так и самих котлов БКЗ-160-1.4-5.
2. Установлено, что экономичность котлов при сжигании смеси топлив возрастает.
3. В результате повышения теплоты сгорания смеси топлив на 1.59 МДж/кг и увеличения КПД брутто котлов расход топлива на ЖТЭЦ снизился на 5943 т/мес (9.2%) по сравнению с расходом проектного бородинского угля.
4. По расчетным оценкам, валовые выбросы диоксида серы при использовании смеси топлив увеличились на 14.4% по сравнению с проектным топливом, выбросы оксидов азота снизились на 5%, твердых частиц в атмосферу — на 25.2%, количество золошлаковых отходов сократилось на 25.3%.
5. Сжигание смесей бурых углей Канско-Ачинского бассейна может рассматриваться как перспективный способ ресурсосбережения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Использование** угля марки 3БР на котлах БКЗ-160-1.4-5 с мельницами-вентиляторами и газовой сушилкой / П.Ю. Гребеньков, С.Г. Козлов, М.Н. Выхристюк, И.А. Худяков, А.А. Концевой // Электрические станции. 2016. № 11. С. 13–18.
2. **РД 34.02.305-98.** Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. М.: ВТИ, 1998.
3. **СО 153-34.02.304-2003.** Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ВТИ, 2005.

An Experiment with Flame Combustion of a Mixture of Brown Coals at the Zheleznogorsk Combined Heat and Power Plant (CHPP)

A. V. Zhuikov^{a, *}, A. I. Karlovskii^b, A. I. Matyushenko^a, P. Yu. Greben'kov^c, S. G. Kozlov^{c, **},
M. N. Vykhristyuk^c, and D. A. Loginov^d

^a Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041 Russia

^b Krasnoyarsk Regional Power Company (AO KrasECO), Krasnoyarsk, 660049 Russia

^c OOO SibVTI, Krasnoyarsk, 660041 Russia

^d OOO Sibniugleobogashchenie, Krasnoyarsk, 660060 Russia

*e-mail: azhuikov@sfu-kras.ru

**e-mail: kozlovsg@sibvti.org

Abstract—The purpose of the study presented in this paper is to assess the engineering and environmental performance during the long-term operation of four BKZ-160-1.4-5 boilers on off-design fuel, consisting of 50% of Grade 2BR brown Borodino coal (with a lower heating value of $Q' = 11.3\text{--}16.3$ MJ/kg) and 50% of Grade 3BR brown Bol'shesyrsk coal ($Q' = 19.3\text{--}20.1$ MJ/kg) from the Kansk-Achinsk basin. The fuel-handling system operated normally with this mixture. The application of water washing eliminated any problems with slagging of the furnace water walls. Increasing the heating values of the coal mixture and the gross efficiency of the boilers reduced the total fuel consumption at the CHPPs. As a result of a decrease in heat losses with flue gases, the efficiency of boilers when operating on the mixture, according to the reported data on the CHPP performance, increased by 0.4%. These data also demonstrate that decreasing the heat losses with the flue gases increased the boiler efficiency by 0.4% when firing the above-mentioned mixture. The gross emission of nitrogen oxides remained at the same level, while the emission of sulfur dioxide increased by 40.6 t/month (14.4%) due to the elevated sulfur content in the fuel mixture. A lower ash content in the fuel mixture decreased the gross atmospheric emissions of solid particles by 15.1 t/month (25.2%), while the amount ash and slag wastes reduced by 1166 t/month (25.3%).

Keywords: boiler, brown coal, fuel mixture, heating value, flame combustion, gross efficiency, ash, harmful emissions, heating surface slagging