

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

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОЭМИССИОННЫХ ГОРЕЛОК
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОТЛЕ УГОЛЬНОЙ ТЭЦ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА

© 2025 г. А. В. Штегман^а, И. А. Рыжий^{а, *},
Д. В. Сосин^а, А. В. Соколова^а, И. И. Трушков^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: ryzhy1987@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Для Омской ТЭЦ-5, расположенной в центре крупного города, особенно острой является необходимость снизить выбросы в атмосферу загрязняющих веществ. Проектное топливо этой электростанции – высокосольный уголь экибастузский КСН (кокосовый слабоспекающийся низкометаморфизованный). Для снижения выбросов золы твердого топлива и оксидов азота NO_x было предложено перейти на сжигание других углей с большей теплотой сгорания и меньшим содержанием золы. Чтобы проверить, возможно ли использовать непроектные угли, было проведено опытное сжигание таких углей, как виноградовский ДР (длиннопламенный рядовой), шубарковский ДР и майкубенский ДР¹, а также выполнено математическое моделирование топочного процесса в программе ANSYS Fluent и составлен тепловой баланс в программе Boiler Designer. В результате проведенных исследований был сделан вывод, что для эффективного использования не-проектного топлива требуется модернизация существующей системы сжигания с установкой новых малоэмиссионных вихревых горелок. На основе данных расчетного исследования в программе ANSYS Fluent была разработана конструкция нового горелочного устройства. Результаты моделирования показали, что применение новых горелок позволит существенно снизить количество образующихся оксидов азота. После разработки проектной документации новые горелки были изготовлены и установлены на котле БКЗ-420-140 № 7 Омской ТЭЦ-5. Его испытания с новыми горелками на проектном угле экибастузский КСН подтвердили эффективность технических решений: концентрация оксидов азота в уходящих газах котла уменьшается в 1.7 раза по сравнению со значениями до реконструкции котла. Также зафиксировано снижение потерь с механическим недожогом и соответствующее увеличение КПД котла. Предварительные опыты по сжиганию непроектного угля виноградовский ДР подтверждают возможность его использования на постоянной основе совместно с углем экибастузский КСН в случае полной реализации проекта.

Ключевые слова: ТЭЦ, снижение газообразных выбросов оксидов азота, выбросы золовых частиц, оксиды азота, непроектный уголь, теплота сгорания, содержание золы, опытное сжигание, моделирование работы котла

DOI: 10.56304/S0040363625700845

На Омской ТЭЦ-5 установлены однорабан-ные газоплотные котлы БКЗ-420-140-5 с естественной циркуляцией, рассчитанные на сжигание каменного угля Экибастузского бассейна (рис. 1). Далее приведены проектные характеристики котла:

Паропроизводительность, т/ч	420
Давление, МПа:	
в барабане	15.59
перегретого пара	13.8

Температура, °С:

перегретого пара	560
питательной воды	230
газов на выходе из топки	1302
уходящих газов	153
Потери тепла с механическим недожогом, %	2.0
Проектный КПД брутто, %	92.03

Топка котла оборудована восемью двухпоточными по аэросмеси и вторичному воздуху вихревыми горелками, расположенными встречно в один ярус на боковых экранах. Растопочным и резервным топливом на ТЭЦ является мазут.

При сжигании высокосольного угля экибастузский КСН образуется большое количество

¹ Используемые в статье результаты, полученные при сжигании непроектных углей, любезно предоставлены руководителем работ главным специалистом ОСП ООО ОРТЭС В.В. Богомоловым.

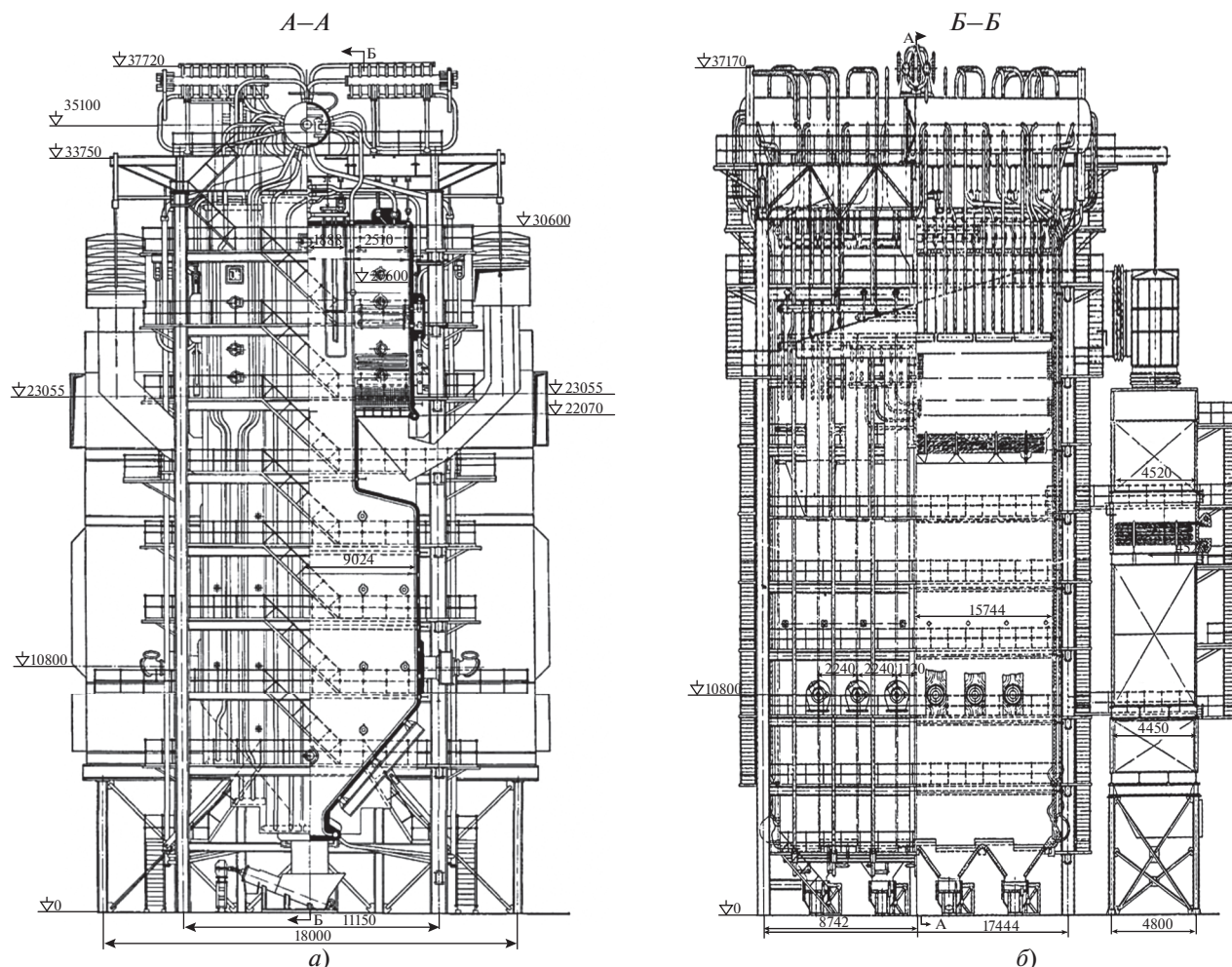


Рис. 1. Поперечный (а) и продольный (б) разрезы котла БКЗ-420-140-5

зола в газах и оксидов азота (более 1000 мг/м^3) в уходящих газах, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Омская ТЭЦ-5 расположена в центре города, поэтому проблема снижения выбросов зола стоит весьма остро. Количество частиц зола, выбрасываемых в атмосферу, зависит от расхода топлива, его зольности и эффективности используемого фильтра. Известны различные варианты снижения выбросов зола, например путем модернизации электрофильтров или установки фильтров тканевого типа. Однако для реализации таких мероприятий требуются существенные капитальные и эксплуатационные затраты. В связи с этим было предложено рассмотреть вариант с расширением диапазона сжигаемых углей. Действительно, при переходе на уголь марки Д низкой зольности открывается возможность уменьшить выбросы зола более чем в 10 раз без использования новых альтернативных золоуловителей. Например, зольность угля Шубаркольского месторождения составляет 6.45%, Виноградовского — 16.05%,

Майкубенского — 12.65%. Следует учесть, что сжигание непроектных углей без модернизации главного и вспомогательного оборудования может сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей котельной установки (КПД, параметров перегретого пара и др.). Для исследования возможности применения на ТЭЦ альтернативных углей было принято решение провести опытное сжигание углей разных месторождений и моделирование работы котла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ КОТЛА

В качестве углей, альтернативных проектному углю экибастузский КСН, исследовались угли типа ДР Шубаркольского [1], Майкубенского и Виноградовского месторождений. Характеристики проектного и альтернативных углей представлены в табл. 1, 2.

Согласно результатам опытного сжигания, при использовании непроектных углей наиболее

Таблица 1. Характеристики исследуемых углей

Уголь (месторождение)	W , %	A , %	S , %	V , %	Q_H , кДж/кг
Шубаркольский ДР (Карагандинская обл., Казахстан)	11.90	6.45	0.435	45.45	1370
Майкубенский ДР (Павлодарская обл., Казахстан)	16.75	12.65	0.50	43.0	1200
Виноградовский ДР (Кузнецкий угольный бассейн, Россия)	15.90	16.05	0.35	39.95	1150
Экибастузский КСН (Павлодарская обл., Казахстан)	5.50	36.60	0.56	31.30	1070

Примечание. W – влажность на рабочую массу; A – зольность на сухую массу; S – содержание серы на сухую массу; V – выход летучих на горючую массу; Q_H – теплота сгорания низшая.

Таблица 2. Элементный и химический составы исследуемых углей

Элемент, оксид	Уголь			
	шубаркольский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР	экибастузский КСН
Элементный состав на рабочую массу, %				
Углерод	63.2	54.0	52.8	49.7
Водород	4.4	3.7	3.8	3.0
Сера	0.34	0.42	0.25	0.53
Азот	1.3	0.7	1.42	0.9
Кислород	13.9	14.3	11.04	5.8
Химический состав минеральной части (на бессульфатную массу и сумму 100%), %				
SiO_2	61.62	45.33	59.24	61.0
Al_2O_3	22.94	22.23	23.75	29.44
TiO_2	0.99	1.04	1.08	1.33
Fe_2O_3	6.38	16.56	7.79	4.03
CaO	2.84	7.81	4.21	2.84
MgO	2.61	3.55	1.74	0.66
K_2O	1.21	1.83	1.73	0.47
Na_2O	1.41	1.65	0.46	0.23

существенными проблемами являются поддержание номинальной температуры перегретого пара и обеспечение бесшлаковочной работы котла. Все непроектные угли имеют среднюю склонность к шлакованию поверхностей нагрева и средневысокую – к шлакованию ширм. Наиболее склонным к шлакованию является уголь майкубенский ДР, наименее шлакующим – виноградовский ДР. Оценку шлакования проводили по склонности к образованию железистых отложений P_{Fe} , отложений на базе активных щелочей P_{Na} , сульфатно-кальциевых отложений P_{CaO} и склонности к шлакованию ширм R_F^{UR} [2]. Гранич-

ные значения показателей, определяющие склонность к шлакованию, приведены в табл. 3, результаты расчета шлакующих свойств углей – в табл. 4.

Альтернативные угли по сравнению с проектным топливом обладают большей калорийностью. В соответствии с результатами ручной пирометрии при их сжигании средняя температура газов в топочной камере на уровне горелочных устройств выше, чем при сжигании проектного угля. Например, при сжигании угля шубаркольский Д средняя температура составила 1300°C, виноградовский Д – 1250°C, майкубенский 3Б – 1245°C. Основываясь на этих значениях, логично

Таблица 3. Граничные значения показателей шлакования

Показатель	Склонность к образованию отложений и шлакованию			
	низкая	средняя	высокая	очень высокая
P_{Fe}	Менее 0.27	0.27–0.55	0.55–0.72	Более 0.72
P_{Na}	Менее 0.40	0.40–0.50	0.50–0.75	Более 0.75
P_{Ca}	Менее 0.42	0.42–0.60	Более 0.60	—
R_F^{UR}	Менее 0.30	0.30–0.52	0.52–0.70	Более 0.70

Таблица 4. Результаты расчета склонности к образованию отложений и шлакованию углей

Показатель	Уголь		
	шубарковский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР
P_{Fe}	0.505 (средняя)	0.473 (средняя)	0.131 (низкая)
P_{Na}	0.435 (средняя)	0.453 (средняя)	0.248 (низкая)
P_{Ca}	0.190 (низкая)	0.326 (низкая)	0.428 (средняя)
R_F^{UR}	0.573 (высокая)	0.635 (высокая)	0.458 (средняя)

предположить, что в данном случае тепловосприимчивость испарительной части котла повышается. При испытаниях это выражалось в росте нагрузки. При этом для поддержания необходимой паропроизводительности требуется меньший расход топлива (вследствие более высокой теплоты сгорания по сравнению с проектным углем), в то же время меньший расход топлива ведет к снижению объемного расхода газов, проходящих через конвективную часть котла. Поэтому скорости газов в поверхностях нагрева падают, тем самым ухудшая конвективный теплообмен и вызывая недогрев пара.

Сравнительные результаты опытного сжигания рассматриваемых углей приведены в табл. 5.

Расчет работы котла на непроектных углях в программе Boiler Designer (табл. 6) показал, что особенно сильно проблема поддержания перегрева проявляется для угля майкубенский ДР: при его сжигании для достижения температуры перегрева 560°C необходимо увеличить коэффициент избытка воздуха α на выходе из топки до 1.4, а анализ температур на выходе из топки показывает наличие риска шлакования ширм при работе на номинальной нагрузке.

Для всесторонней оценки особенностей процесса сжигания разных углей было выполнено моделирование топочного устройства котла в программе ANSYS Fluent. Для этого в программе Solid Works была построена трехмерная модель топочного устройства с горелками и соплами. Для

снижения количества точек были внесены упрощения, например горелку заменяли кольцевыми каналами на поверхности экранов, площади сечения которых соответствовали площадям реальных горелок. Аналогично были прорисованы сопла. В дальнейшем в области расположения корня факела было выполнено сгущение сетки методом Sphere of Influence. Граничные условия задавали локальными цилиндрическими координатами и векторами. Для того чтобы корректно смоделировать горение топлива, был применен подход Multiple-Surface-Reaction с заданием кинетики горения углерода. Результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3.

Особое внимание уделялось отладке моделей до достижения максимальной сходимости с результатами испытаний. Данные табл. 7 показывают достаточно высокую сходимость расчета с результатами испытаний по таким показателям, как температура на выходе из топки, потери с механическим недожогом и концентрация оксидов азота. В дальнейшем эти модели будут использоваться для прогнозирования изменений в показателях работы котла.

Сравнивая различные варианты, можно видеть, что температуры на выходе из топки снижаются при переходе на непроектные угли. Этот фактор существенно повлияет на удержание температуры свежего пара. Следует отметить, что в целом картина развития факельного процесса схожа для всех углей.

Таблица 5. Результаты опытного сжигания углей различных марок

Параметр	Уголь			
	экибастузский КСН	шубаркольский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР
Ограничения в работе оборудования топливopодaчи				
Оборудование топливopодaчи	Нет	Нет	Самовозгорание в штабеле после хранения в течение месяца	Единичный случай продольного порыва ленты ЛП-3Б из-за скопления крупных кусков угля в устье бункера
Ограничения в работе пылесистем				
Взрывобезопасность	Нет (группа I)	Нет (группа IV)	Нет (группа III)	Нет (группа III)
Размольная и сушильная производ- тельность (фактическая, т/ч)	Нет (14.6–18.0)	Нет (10.9–13.3)	Нет (13.6–16.2)	Нет (12.2–14.4)
Срок службы бил, ч	2000	3000	–	3000
Бункеры сырого угля (зависание угля)	Нет (при $W \leq 7\%$)	Единичный случай	Нет (при $W \leq 22\%$)	Нет (при $W \leq 17\%$)
Питатели сырого угля	Нет	Нет	Нет	Нет
Забивание течек	В сравнительных опытах не отмечено	Эпизодическое забивание, чаще течки 4А и 4Г		
Ограничения в работе топочно-горелочного устройства				
Воспламенение, горение, выгорание	Нет	Нет	Нет	Нет
Поддержание номинальной темпера- туры перегрева	Нет	Есть		
Диапазон регулирования температуры перегрева	Недостаточный			
Шлакование топки	Нет	Нет	Есть	Нет

Таблица 5. Окончание

Параметр	Уголь			
	экибастузский КСН	шубаркольский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР
Шлакование конвективных поверхностей нагрева	Нет		Есть	
Бесшлаковочная нагрузка котла, т/ч	420	290–300	310–320	360–370
Ограничения в работе тягодутьевых механизмов				
Дутьевой вентилятор	Нет	Нет	Нет	Нет
Дымосос	Нет		Есть	
Вентилятор горячего дутья	Нет	Нет	Нет	Нет
Основные технико-экономические показатели при номинальной нагрузке котла				
Приведенный КПД brutto, %	89.6	91.4	91.2 (приведенная нагрузка 340 т/ч)	91.2
Температура уходящих газов за воздухоподогревателем, °С	153	177	159	158
Приведенные потери с уходящими газами, %	7.1	7.9	7.9	7.6
Потери с механическим недожогом, %	3.0	0.2	0.5	0.8
Затраты электроэнергии, кВт · ч/т				
На тягодутьевые механизмы	4.8	4.8	5.2	5.0
На пылеприготовление	3.6	2.6	3.0	3.6
Экологические показатели работы котла				
C_{NO_x} , мг/м ³	910	560	500	650

Примечание. C_{NO_x} — приведенная концентрация оксидов азота в уходящих газах при нормальных условиях и $\alpha = 1.4$.

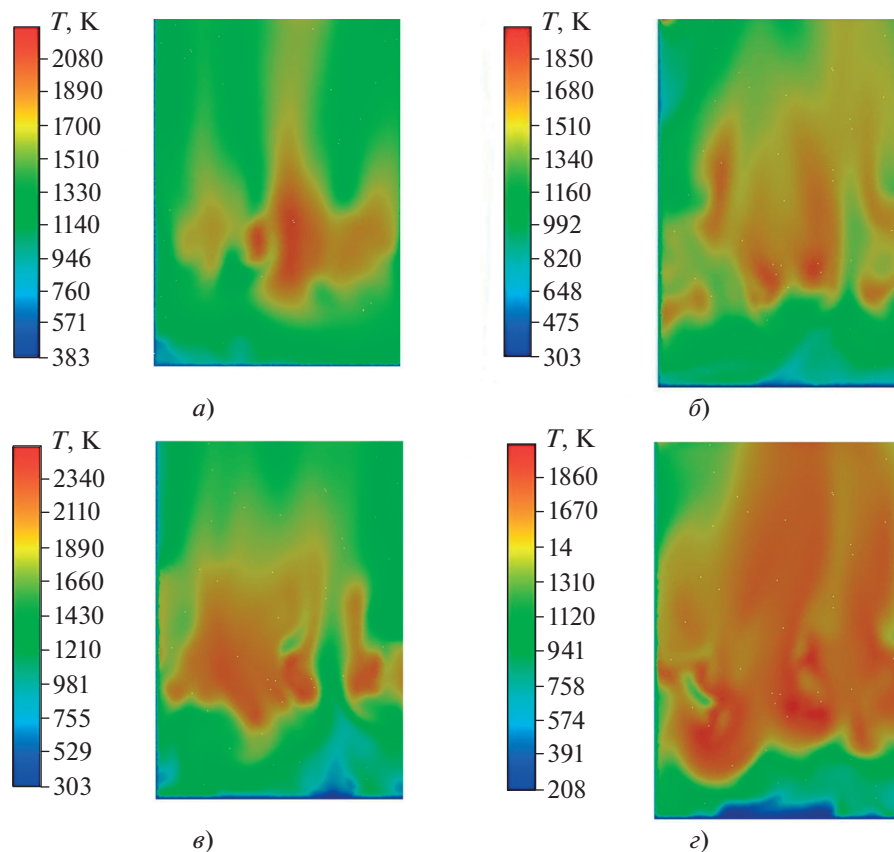


Рис. 2. Поля температур T в продольном сечении топки котла при сжигании углей: экибастузский КСН (а), шубаркольский ДР (б), майкубенский ДР (в), виноградовский ДР (г)

Таблица 6. Результаты теплового расчета котла в программе BoilerDesigner

Параметр	Уголь			
	экибастузский КСН	шубаркольский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР
Паропроизводительность котла, т/ч	420	420	420	420
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	1.2	1.2	1.4	1.2
Температура, °C:				
на выходе из топки	1299.0	1338.0	1261.4	1264.5
уходящих газов (за ТВП)	156.0	174.4	181.7	173.2
горячего воздуха (за ТВП-2)	426.0	410.0	439.2	410.6
перегретого пара	560	560	560	560
Расход топлива, т/ч	72.04	46.75	55.42	54.78
КПД котла брутто, %	90.25	92.04	90.30	91.35

Примечание. ТВП – трубчатый воздухоподогреватель.

Таблица 7. Результаты моделирования и испытаний процесса горения топлива

Уголь	Температура на выходе из топки, °C	Механический недожог, %	Концентрация NO _x , мг/м ³
Экибастузский КСН	1192/1183	3.15/3.0	874/910
Шубаркольский ДР	1324/1330	0.38/0.2	583/560
Майкубенский ДР	1227/1235	0.39/0.5	515/500
Виноградовский ДР	1223/1235	0.72/0.8	678/650

Примечание. В числителе – результаты испытаний, в знаменателе – результаты моделирования.

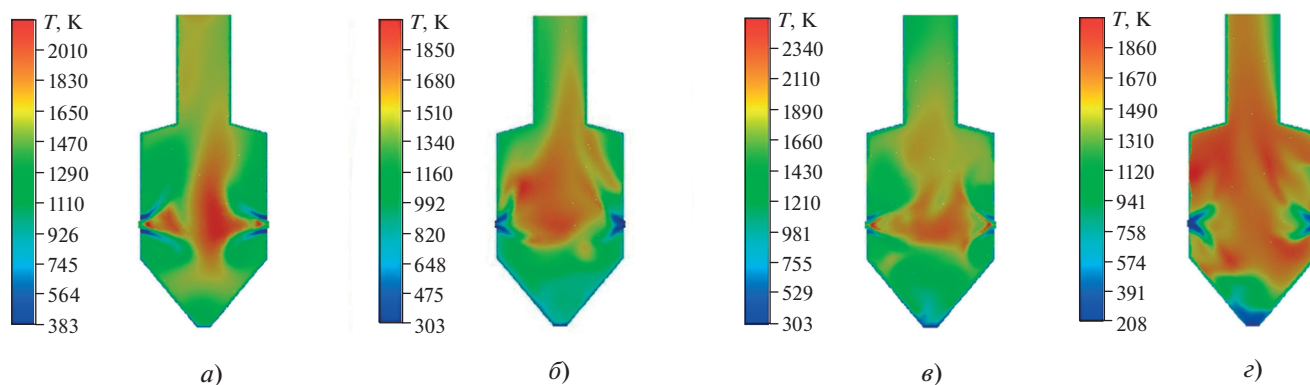


Рис. 3. Поля температур T в поперечном сечении топки котла при сжигании углей: экибастузский КСН (а), шубар-кольский ДР (б), майкубенский ДР (в), виноградовский ДР (г)

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛКИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

На этапе разработки технических решений по модернизации котла была принята концепция нового горелочного устройства, включающего в себя три канала вторичного воздуха и два канала аэросмеси (рис. 4). При такой конструкции можно загружать бункеры разным углем [низкокалорийным (проектным) и высококалорийным (непроектным)], сжигать твердые топлива различных типов с сохранением необходимого скоростного режима горелочного устройства. На внутренние каналы аэросмеси работают мельницы Б и В, на внешние — А и Г. При этом благодаря наличию трех каналов вторичного воздуха расширяется диапазон регулирования его скорости (закрытием/открытием отдельных каналов). Таким образом, при любом режиме работы можно обеспечить оптимальное соотношение скоростей вторичного w_2 и первичного w_1 воздуха (w_2/w_1) [3–5].

Далее указаны конструктивные характеристики нового горелочного устройства:

Внешний диаметр, мм:

канала вторичного воздуха:

№ 1	843
№ 2	1020
№ 3	1260

канала аэросмеси:

№ 1	500
№ 2	680

трубы мазутной форсунки 219

Толщина стенки, мм:

наружной канала вторичного воздуха № 2	5
других обечаек	10

Параметры процесса работы нового горелочного устройства приведены в табл. 8.

Обеспечение пониженной концентрации оксидов азота при функционировании горелочного

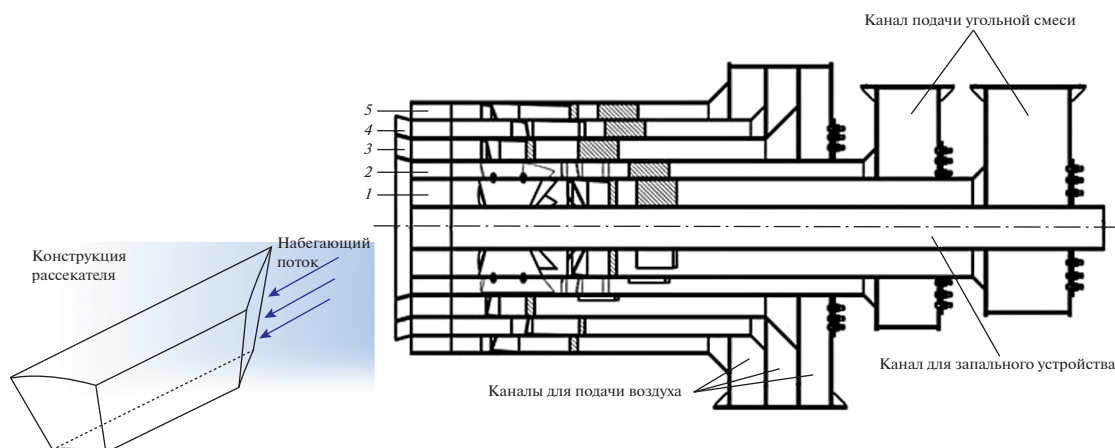


Рис. 4. Общий вид малотоксичной вихревой горелки.

1, 2 — каналы аэросмеси № 1 и 2; 3, 4, 5 — каналы вторичного воздуха № 1, 2 и 3

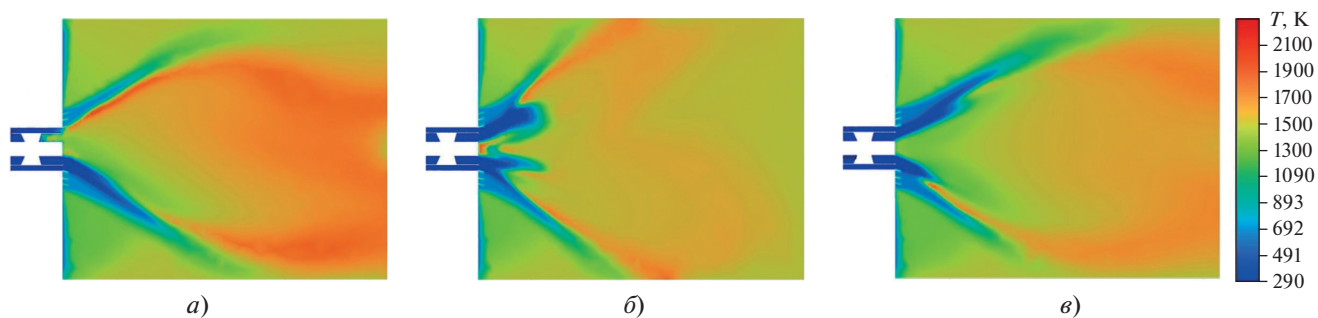
Таблица 8. Параметры процесса работы нового горелочного устройства

Параметр	Уголь		
	шубаркольский ДР	майкубенский ДР	виноградовский ДР
Коэффициент избытка воздуха:			
в канале аэросмеси:			
№ 1	0.15	0.17	0.15
№ 2	0.15	0.17	0.15
в канале вторичного воздуха:			
№ 1	0.30	0.34	0.29
№ 2	0.36	0.40	0.35
№ 3	0.19	0.27	0.21
Скорость, м/с:			
в канале аэросмеси:			
№ 1	19.33	20.27	18.95
№ 2	19.00	19.92	18.63
в канале вторичного воздуха:			
№ 1	34.65	33.63	30.91
№ 2	41.26	39.71	36.70
№ 3	13.55	29.80	19.87
Расход топлива на горелку, кг/с	1.62	1.92	1.90
Температура, °С:			
аэросмеси	62	82	82
вторичного воздуха	413	439	426

устройства достигается с помощью установки в каналах аэросмеси рассекателей потоков пыли. Рассекатели формируют на выходе из горелки струи с концентрированной пылью, в результате чего воспламенение топлива происходит в условиях пониженной концентрации кислорода. Благодаря этому снижается интенсивность образования топливных оксидов азота [6]. Данное решение было успешно опробовано при замене горелок на Троицкой ГРЭС и показало высокую эффективность: концентрация оксидов азота снизилась примерно в 1.5 раза [7].

Результаты моделирования работы горелки в программе ANSYS Fluent представлены на рис. 5–8, в численном виде – в табл. 9.

Развитие процесса горения происходит не одинаково. Самое быстрое воспламенение наблюдается на угле майкубенский ДР, тогда как при сжигании углей виноградовский ДР и шубаркольский ДР зоны высоких температур располагаются на расстоянии одного калибра от начального участка факела. Поле максимальных температур на угле шубаркольский ДР сконцентрировано в корне факела, а на угле виноградовский ДР – в струях топлива. Выход летучих на угле майкубенский ДР начинается раньше, чем на остальных углях, и воспламенение происходит уже внутри горелки. Это не является положительным фактором и может привести к шлакованию.

**Рис. 5.** Поле температур горелочного устройства при сжигании углей майкубенский ДР (а), шубаркольский ДР (б), виноградовский ДР (в)

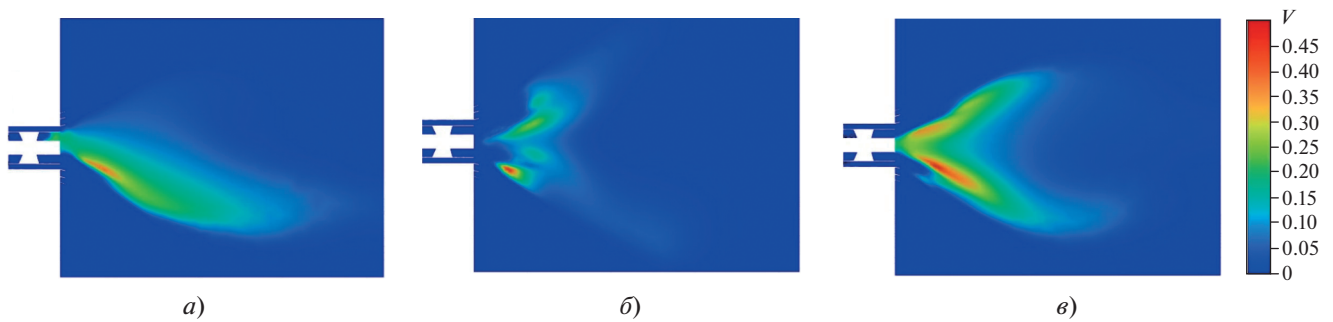


Рис. 6. Поле массовой доли летучих V при сжигании углей майкубенский ДР (а), шубаркольский ДР (б), виноградовский ДР (в)

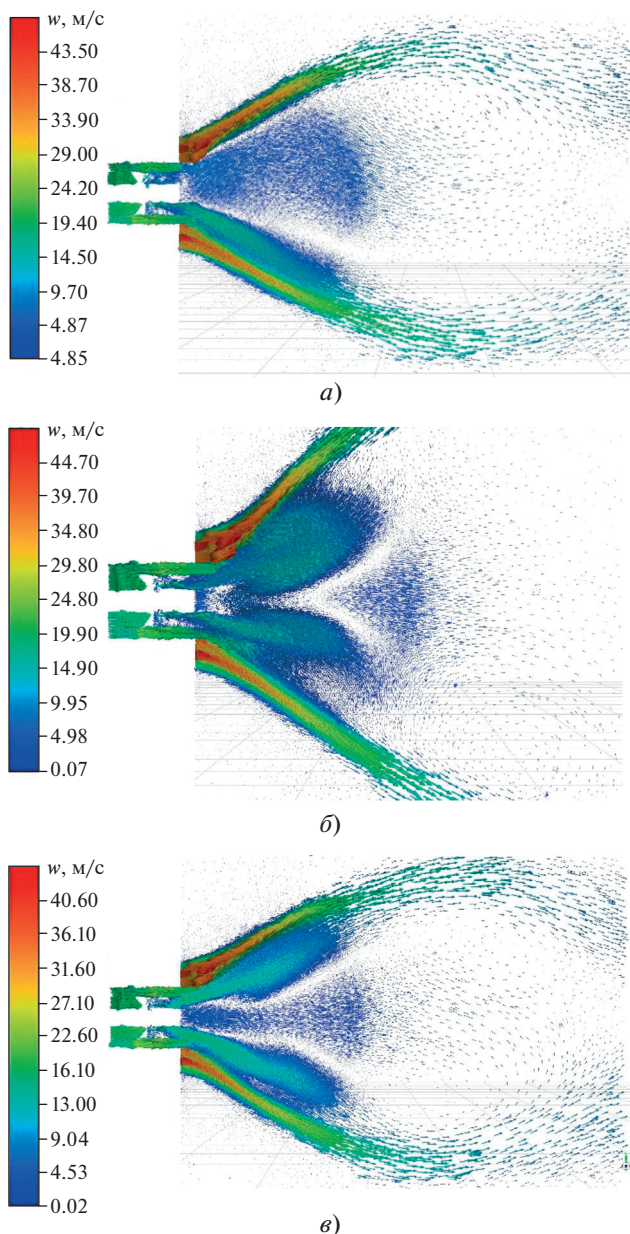


Рис. 7. Векторное поле скоростей w при сжигании углей майкубенский ДР (а), шубаркольский ДР (б), виноградовский ДР (в)

Кроме того, анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 9, показывает, что исходное содержание азота в топливе влияет на содержание оксидов азота в граничном условии “Выход”. Так, максимальному содержанию азота в угле (виноградовский ДР, 1.42%) соответствует максимальная концентрация NO_x , а минимальному (майкубенский ДР, 0.7%) – минимальная концентрация NO_x . Для оценки концентрации оксидов азота подключали особые подмодели: Fuel- NO_x для топливных, формирующихся из летучих компонентов топлива в зоне факела, и Thermal- NO_x для термических, образующихся по механизму Зельдовича.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОТЛА ПОСЛЕ УСТАНОВКИ НОВЫХ ГОРЕЛОК

После разработки проектной документации горелочные устройства, изготовленные в ОАО ВТИ, были установлены на котле БКЗ-420-140 ст. № 7 Омской ТЭЦ-5 (рис. 9). Изначально, помимо замены горелочных устройств, планировалось проведение дополнительных мероприятий по обеспечению эффективного использования не проектных углей, в том числе:

размещение сопл третичного дутья выше основной зоны горения в целях более значительно снижения выбросов NO_x и возможности регулирования температуры перегретого пара путем изменения доли третичного воздуха [8];

установка глубоководных обдувочных аппаратов для устранения проблемы шлакования поверхностей нагрева.

Однако из-за ограниченного времени ремонта котла было принято решение установить на данном этапе только новые горелочные устройства. Для регулирования шиберами на каналах вторичного воздуха со щита управления котла использовали отдельный монитор (рис. 10).

В 2023 г. были проведены испытания котла с нагрузками 280–420 т/ч с новыми горелками при сжигании проектного угля экибастузский КСН. Во всех исследованных режимах работы котла

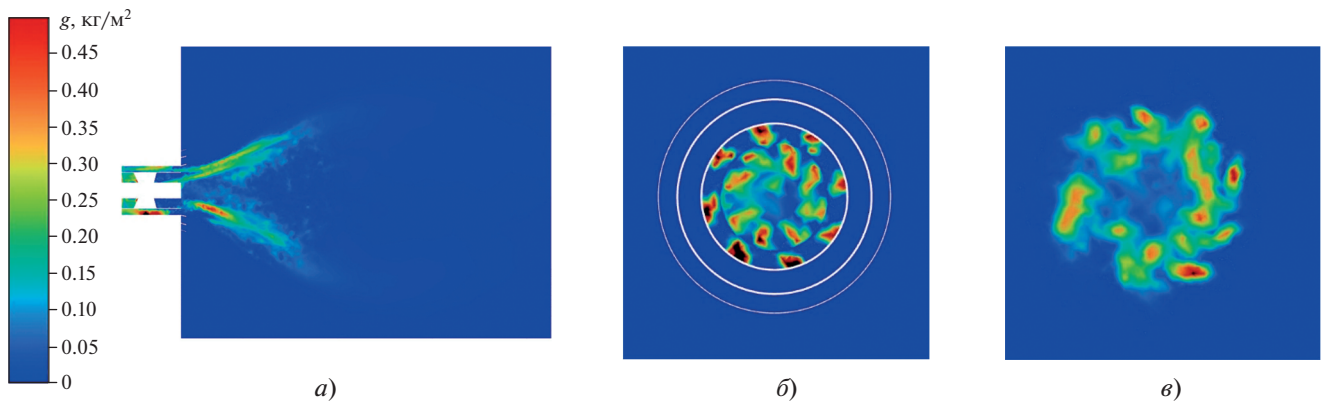


Рис. 8. Концентрация твердой фазы g на выходе из горелки (а), на срезе горелки (б), на расстоянии одного калибра от горелки (в)

потери тепла с механическим недожогом изменялись в диапазоне от 0.55% (при минимальной нагрузке) до 1.80% (при максимальной нагрузке). Согласно режимной карте котельного агрегата № 7 до реконструкции эти потери на эквивалентных нагрузках составляли 1.27–3.10%. Механический недожог определяли в пробах золы под фильтром и шлака из шлаковой ванны, содержание несгоревшего углерода – при прокаливании пробы в специальных печах. Благодаря

снижению потерь с механическим недожогом КПД котла несколько увеличился.

До реконструкции котла при работе на номинальной нагрузке концентрация оксидов азота NO_x в уходящих газах составляла 910 мг/м^3 , после реконструкции – 550 мг/м^3 (приведенная к $\alpha = 1.4$). Сравнительные показатели работы котла на угле экибастузский КСН до и после реконструкции представлены в табл. 10. В каждом опыте с помощью

Таблица 9. Расчетные показатели работы горелки по результатам моделирования

Уголь	Средняя температура факела, К	Удельное содержание твердого углерода, г/кг	Удельная концентрация на выходе горелки, г/кг	
			CO	NO_x
Шубаркольский ДР	1489	0.947	5.065	4.875
Майкубенский ДР	1658	3.466	8.402	4.455
Виноградовский ДР	1448	3.194	10.913	6.671

Таблица 10. Показатели работы котла при сжигании угля экибастузский КСН

Параметр	Значение	
	до реконструкции	после реконструкции*
Концентрация NO_x в уходящих газах (при $\alpha = 1.4$) (в пересчете на стандартные условия), мг/м^3	910	550
Содержание горючих, %:		
в уносе	4.9	3.55
в шлаке	0.8	0.99
Потери тепла, %:		
с механическим недожогом	3.0	1.8
с уходящими газами (приведенные)	7.1	7.4
КПД котла брутто, %	89.6	90.5

* Усредненные данные в опытах на номинальной нагрузке.



Рис. 9. Горелочные устройства в процессе изготовления (*а–в*) и после монтажа (*г*)

ручного газоанализатора измеряли концентрации NO_x и SO_x в газах. Замеры проводили в трех точках: в переходном газоходе, на выходе из котла (за ТВП) и после дымососа.

Предварительные опыты при работе котла на непроектном угле виноградовский ДР показали возможность его эффективного сжигания при новых горелках. Однако полная отладка топочного режима на номинальной нагрузке оказалась невозможной вследствие повреждения отдельных шиберов на воздушных каналах горелок. Кроме того, было отмечено, что установка на котле сопел третичного дутья (как это планировалось изначально) позволила бы в значительной степени улучшить работу котла при сжигании непроектного угля. Целесообразно рассмотреть возможность реализации данного мероприятия в будущем.

В настоящий момент рекомендовано сжигать уголь виноградовский ДР при нагрузке котла не более 380 т/ч, а также чередовать использование его в смеси с углем экибастузский КСН в пропорции 50/50% для достижения эффекта саморасшлаковки поверхностей нагрева.



ВЫВОДЫ

1. При использовании новой вихревой малотоксичной горелки обеспечивается эффективное сжигание как проектного угля экибастузский КСН, так и непроектных углей марки ДР благодаря расширенным возможностям регулирования расходов первичного и вторичного воздуха.

2. При работе котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-5 с новыми горелками на номинальной нагрузке при сжигании проектного угля экибастузский КСН концентрация NO_x снизилась на 40% по сравнению с таковой до реконструкции, потери с механическим недожогом уменьшились на 1.2%, КПД котла вырос на 0.9%.

3. При дальнейшей модернизации котла необходимо установить сопла третичного дутья, что позволит снизить концентрацию NO_x и обеспечит дополнительные возможности регулирования температуры перегретого пара за счет распределения воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сосин Д.В., Штегман А.В.** Опыт сжигания каменного угля марки Д разреза АО "Шубарколь Коми" в

котлах блоков 225 МВт Черепетской ГРЭС // Электротехнические станции. 2017. № 2. С. 19–22.

2. **Изюмов М.А., Супранов В.М., Плешанов К.А.** Паровые котлы: принятие технических решений и проектирование: учеб. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.
3. **ОСТ 108.030.26-78.** Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования. М.: НПО ЦКТИ, 1979.
4. **Методические** указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.Г. Жмерика. СПб.: ЦКТИ, 1996.
5. **Изюмов М.А., Росляков П.В.** Проектирование и расчет горелок. М.: МЭИ, 1990.
6. **Котлер В.Р.** Снижение выбросов оксидов азота в котельных установках ТЭС: учеб.-метод. пособие. М.: ИПК-госслужбы, 2011.
7. **Успешная** реконструкция котла П-57 блока 500 МВт Троицкой ГРЭС / Д.В. Сосин, И.А. Рыжий, А.В. Штегман, В.Р. Котлер // Энергетик. 2014. № 4. С. 34–38.
8. **Синило А.В., Шалунов А.В.** Методы снижения образования оксидов азота в топках котлов при сжигании угля // Тр. Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Новокузнецк, 2019. Вып. 23. Ч. VI. С. 304–311.

Experience Gained from Applying Low Emission Burners in a Coal Fired CHPP Power Generating Boiler for Reducing Nitrogen Oxide Emissions

A. V. Shtegman^a, I. A. Ryzhii^{a, *}, D. V. Sosin^a, A. V. Sokolova^a, and I. I. Trushkov^a

^a All-Russian Thermal Engineering Institute (JSC VTI), Moscow, 115280 Russia

*e-mail: ryzhy1987@mail.ru

Abstract—For the Omsk combined heat and power plant no. 5 (Omsk CHPP-5), which is located in the central part of a large city, there is an acute need to reduce the atmospheric emissions of pollutants. Grade KSN (coking low-caking low-metamorphized) high-ash Ekibastuz coal is the design fuel for this power plant. For reducing the solid fuel fly ash and nitrogen oxide NO_x emissions, it was proposed to make a shift for combustion of other coals having a higher heating value and lower ash content. To see whether or not off-design coals can be used, experimental combustion of such coals as grade DR (as-received, jet) Vinogradov coal, grade DR Shubarkol coal, and grade DR Maikubensk coal was carried out; the furnace process mathematical simulation was performed out in the ANSYS Fluent software, and the thermal balance was compiled in the Boiler Designer software. As a result of the studies performed, a conclusion has been drawn that for securing efficient use of off-design fuel, it is necessary to modernize the existing combustion system with installing new low emission vortex burners. Based on the data of a computational study carried out in the ANSYS Fluent software, the design of a new burner was developed. The simulation results have shown that by using the new burners it will be possible to achieve a significantly lower amount of nitrogen oxide emissions produced. After the design documentation had been developed, the new burners were manufactured and installed in BKZ-420-140 boiler No. 7 at the Omsk CHPP-5. The tests of the boiler equipped with the new burners carried out with combustion of design grade KSN Ekibastuz coal have confirmed the effectiveness of the adopted technical solutions: the concentration of nitrogen oxides in the boiler flue gases is a factor 1.7 lower in comparison with the values that were before the boiler refurbishment. A lower level of carbon-in-ash losses and the corresponding increase in the boiler efficiency have been recorded. Preliminary experiments on combusting off-design grade DR Vinogradov coal confirm the possibility of using it on a regular basis jointly with grade KSN Ekibastuz coal provided that the project has been implemented in a full scope.

Keywords: CHPP, reduction of gaseous nitrogen oxide emissions, fly ash particle emissions, nitrogen oxides, off-design coal, heating value, ash content, experimental combustion, simulation of boiler operation