УДК 621.181.01:536.25(0.43.3)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОТЛА Е-160 ПРИ СЖИГАНИИ ИРША-БОРОДИНСКОГО УГЛЯ

© 2021 г. О.Г.Шишканов*

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия *e-mail: shishkanovoleg@yandex.ru

> Поступила в редакцию 16.11.2020 г. После доработки 01.12.2020 г. Принята к публикации 24.02.2021 г.

В статье представлены результаты экспериментальных измерений и зонального математического моделирования теплообмена в топочной камере котла E-160 при факельном тангенциальном сжигании ирша-бородинского угля. Выявлен высокий уровень тепловых неравномерностей как по высоте, так и в сечениях топочной камеры. Кроме того, установлено, что содержание оксидов азота в дымовых газах превышает нормативные требования. Для совершенствования режимных параметров эксплуатации котла в части обеспечения бесшлаковочных условий несения номинальной нагрузки и предотвращения роста внутритрубных отложений в экранных поверхностях нагрева автором предложены рациональные схемы распределения топлива между ярусами горелок, а также по блокам горелок при отключении одной из индивидуальных пылесистем прямого вдувания.

Ключевые слова: паровой котел E-160, тангенциальная топочная камера, горелки, индивидуальные пылесистемы, экспериментальные измерения, зональная математическая модель теплообмена, оксиды азота

DOI: 10.31857/S0002331021010143

введение

Повышение экономических, экологических и других показателей работы энергетического оборудования за счет совершенствования конструкции устройства или режимов его эксплуатации осуществляется наиболее эффективно, когда разрабатываемые технические решения обоснованы результатами как экспериментальных, так и расчетных исследований [1–8]. При этом преимуществом экспериментальных измерений является выявление особенностей протекающих процессов, а также установление причин их возникновения. Это важно, поскольку ряд параметров работы элементов основного и вспомогательного котельного оборудования напрямую не диагностируется штатной системой контроля и остаются без своевременного оперативного воздействия эксплуатационного персонала. В свою очередь, применение численных методов с учетом экспериментальных данных позволяет оценить как отдельное, так и взаимное влияние различных факторов (например, характеристик режима сжигания), а также выбрать наиболее рациональные их сочетания. Таким образом, уменьшается риск при внедрении разработанных технических предложений, а также обеспечивается значительное сокращение затрат времени и средств на последующую наладку и ввод в эксплуатацию.

С целью совершенствования режимных параметров при энергетическом сжигании угля Ирша-Бородинского разреза проводился комплекс экспериментальных и расчетных исследований теплообмена в топке котла E-160-1.4-250 БТ (далее — котел E-160) Железногорской ТЭЦ. Этот котлоагрегат с естественной циркуляцией и твердым шлакоудалением предназначен для получения пара среднего давления при сжигании бурых канско-ачинских углей. Введен в эксплуатацию во второй половине 2012 года и спроектирован для работы со следующими параметрами:

- номинальная производительность по пару 160 т/ч;
- рабочее давление пара в барабане 1.9 МПа;
- номинальное давление пара 1.4 МПа.
- номинальная температура пара 250°С;
- номинальная температура питательной воды 104°С.

Котельный агрегат Е-160 П-образной компоновки имеет топочную камеру (рис. 1a) обычной призматической формы с размерами в плане 6600 × 7040 мм (по осям труб), которая оборудована восьмью угловыми прямоточными щелевыми горелками, расположенными в два яруса по высоте. Оси угловых горелок направлены по касательной к условной окружности с диаметром 900 мм, за счет чего в центре топки формируется тангенциальное вихревое движение газовых потоков. Номинальная нагрузка котла в процессе эксплуатации обеспечивается, как правило, работой трех из четырех индивидуальных пылесистем прямого вдувания, оборудованных мельницами-вентиляторами. Подготовленная в мельнице-вентиляторе аэросмесь через пыледелитель поступает в соответствующий блок горелок. При отключении мельницы-вентилятора в блок горелок подается только вторичный воздух для его охлаждения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе экспериментов исследовалось влияние схем включения индивидуальных пылесистем котла, что соответствует сочетанию работы блоков горелок, на распределение плотности падающих радиационных потоков на экранные поверхности топочной камеры. Другие показатели тепловой работы котлоагрегата фиксировались штатной системой оперативного управления. Кроме того, при проведении опытов измерялся состав дымовых газов. Подробнее об условиях проведения экспериментов и используемом измерительном оборудовании изложено в [9].

Отметим, что эксплуатация котла на трех пылесистемах является штатной ситуацией, поскольку, как правило, одна из пылесистем находится в ремонте или резерве. Работа котла в таких режимах составляет ~90% от общего времени эксплуатации.

Всего было проведено 5 опытов с сочетанием работающих пылесистем: АБВ (опыт 1), АБГ (опыт 2), БВГ (опыт 3), АВГ (опыт 4), АБВГ (опыт 5). Эксплуатационные показатели работы котлоагрегата во время экспериментов представлены в табл. 1. Общее число точек измерения в каждом опыте составляло 28, по числу доступных смотровых лючков топочной камеры.

Из представленных данных (табл. 1) видно, что в первом опыте нагрузка котла по пару составила $D = 0.93D_{H}$, во втором $D = 0.88D_{H}$. В опытах 3 и 4 нагрузка составляла 0.85 номинала. В опыте 5 ее значение $-0.94D_{H}$, что наиболее близко к номинальной производительности (D_{H}).

Наряду с проведением натурных экспериментов в исследованиях применялись численные методы. В качестве последнего, как наиболее перспективного и обеспечивающего хорошую разрешающую способность получаемых результатов, использовался зональный метод, а именно, разработанная на его основе трехмерная многозонная математическая модель теплообмена [10].

Для зонального моделирования сложного теплообмена объем топочной камеры котла E-160 разбивался на 11 расчетных ярусов по высоте. Из них: объем холодной во-

83



Рис. 1. Конструкция топочной камеры котла E-160 с обозначением пылесистем (А–Б–В–Г) (а) и схема разбиения ее на расчетные зоны (б).

Номер опыта	Нагруз- ка кот- ла, т/ч	Характеристики пара							Дымовые	
		в бара- бане	за котлом		Сочета- ние ра- ботаю-	Характеристики питательной воды		Кисло- род О ₂ ,	перед электро- фильтром	
		давле- ние, МПа	темпера- тура, °С	давле- ние, МПа	щих пы- лесистем	давле- ние, МПа	темпера- тура, °С	%	темпера- тура, °С	
1	149	1.73	250	1.26	А, Б, В	3.01	101	2.3/1.7	165	
2	140	1.76	250	1.30	А, Б, Г	3.09	103	4.4/3.3	164	
3	136	1.71	250	1.24	Б, В, Г	3.00	103	4.9/5.1	163	
4	134	1.73	250	1.27	Α, Β, Γ	3.01	103	4.8/4.5	162	
5	152	1.78	250	1.34	А, Б, В, Г	3.09	106	5.4/5.9	165	

Таблица 1. Эксплуатационные показатели работы котла Е-160-1.4-250 БТ во время проведения измерений

Режимные параметры	Значение	Размерность
Паропроизводительность	160	т/ч
Температура рабочей среды в экранах	200	°C
Температура горячего воздуха	356	°C
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	1.2	—
Доля газов рециркуляции	0.12	—
Температура газов рециркуляции	158	°C
Доля воздуха от теоретически необходимого на сопла нижнего дутья	0.2	—
Расход топлива	7.35	кг/с
Теплота сгорания топлива	3930	ккал/кг

Таб	лица 2	. Данные	эксплуатацион	нного режима,	принятого	при моделиро	вании
-----	--------	----------	---------------	---------------	-----------	--------------	-------

Таблица 3. Выгорание топлива и коэффициенты поглощения топочной средой в объемных зонах

Параметр	Номера объемных зон модели										
Параметр	1	2-4	5-13	14-22	23-31	32-40	41-49	50	51	52	53
Доля выгорания топлива	-	_	_	0.463	0.486	0.023	_	_	_	-	_
Коэффициенты поглощения, м ⁻¹	0.30	0.27	0.24–0.35	0.21-0.27	0.21-0.26	0.17-0.27	0.19–0.29	0.22	0.23	0.24	0.25

ронки — 2 яруса, пространство под зоной активного горения — 1 ярус, зона активного горения — 2 яруса, зона догорания топлива — 3 яруса и пространство, примыкающее к выходному окну топки — 3 яруса. В сечении расчетного яруса выделялось 8 объемных пристенных зон (из них четыре — угловые) и 1 центральная зона. Такая разбивка позволяет учесть в расчетах температурную неравномерность, возникающую вследствие отключения индивидуальной пылесистемы прямого вдувания, а вместе с ней и соответствующего блока горелок.

Общее число зон математической модели составило 123, из них 53 — объемные, остальные — поверхностные (рис. 16). Характеристики основного режима эксплуатации при моделировании представлены в табл. 2.

Массообмен угольной пыли, воздуха и других компонентов топочной среды в ярусах областей горения и дожигания топлива между зонами пристенного и центрального слоев математической модели определялся по результатам изотермического моделирования различных схем включения горелочных блоков [11]. С учетом распределения скоростей вычислялся расход компонентов топочной среды, участвующих во вращательном движении, через вертикальное сечение яруса. Найденный расход распределялся между зонами, входящими в этот ярус, в виде взаимных перетоков воздуха и продуктов сгорания пропорционально величинам расхода газов через вертикальные сечения объемных зон по ходу движения газов.

Выгорание топлива в объемных зонах топки задавалось в соответствии с результатами экспериментальных исследований горения пыли ирша-бородинского угля. Значения коэффициентов поглощения топочной средой рассчитывались в соответствии с рекомендациями Нормативного метода [12]. Результаты представлены в табл. 3.



Рис. 2. Распределение плотности падающих радиационных потоков (опыт N_{2} – откл. В).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе экспериментов плотности падающих на экраны топочной камеры радиационных потоков представлены на рис. 2 и 3 для условий работы котла на трех пылесистемах (соответственно АБГ и БВГ). Следует отметить, что при других схемах включения пылесистем картина распределения измеренных радиационных характеристик существенно не менялась. Характерное изменение зарегистрировано только тогда, когда в работе находились все четыре пылесистемы котла, то есть топливно-воздушная смесь подавалась во все четыре блока горелок в опыте 5 (рис. 4).

Как видно из построенных на основании экспериментальных данных изорад (рис. 2–4), наибольшие величины плотности падающих радиационных потоков зафиксированы на высоте верхнего яруса горелок. Максимум 266 кВт/м² был зафиксирован на фронтовом экране в опыте 1 с показателями режима: $D = 0.93D_{\rm H}$, $\alpha = 1.2$ и с отключением пылесистемы Г.

В других опытах максимум плотности падающих радиационных потоков находился в диапазоне: $232-256 \text{ kBt/m}^2$ и его местоположение на соответствующей экранной поверхности менялось в зависимости от того, какой горелочный блок находился в резерве. В случае работы всех пылесистем котла – $q_{max} = 210-229 \text{ kBt/m}^2$.

Отметим, что зафиксированный в экспериментах уровень падающего на стены топочной камеры излучения не приводил к появлению в отложениях золы жидкой фазы при сжигании ирша-бородинского угля. Шлакование экранов и ширм в ходе экспериментов не наблюдалось. Снижению шлакующих свойств частиц золы способствовало наличие в топочной камере во время опытов окислительной атмосферы и уменьшение



Рис. 3. Распределение плотности падающих радиационных потоков (опыт № 3 – откл. А).

температур газов за счет подачи для сжигания угольной пыли избыточного воздуха ($\alpha = 1.31 - 1.45$).

Однако, в условиях увеличения паропроизводительности работы котла до номинальных значений (160 т/ч), а также при выдерживании эксплуатационных параметров сжигания до рекомендованных режимными картами ($\alpha = 1.2$), следует ожидать повышение температурного уровня в топке и, как следствие, рост значений плотности падающих радиационных потоков до 275–285 кВт/м². А это уже достаточно близко к нижней границы значений (~290–300 кВт/м²), при которых наблюдается появление шлакозоловых отложений на экранных поверхностях при энергетическом сжигании угля Ирша-Бородинского разреза [13].

В опытах зафиксирована значительная тепловая неравномерность не только по высоте топочной камеры (превышение максимума над средним значением на высоте второго яруса горелок составило: $q_{max} = 1.27 - 1.61 q_{cpeg}$), но и в горизонтальных сечениях — 64—84 кВт/м². Последнее определялось как разница между максимальным и минимальным показателями плотности падающих радиационных потоков, зарегистрированных в центральных лючках экранов.

Наличие тепловой неравномерности между экранными поверхностями вызвано соответствующим смещением факела относительно центра в сторону стен, что, в свою очередь, является следствием отключения одной из четырех пылесистем котла и прекращением подачи топливно-воздушной смеси в блок горелок. При включении четырех пылесистем положение тангенциального факела относительно центра симметрично и поэтому температурная неравномерность сокращается до минимальных значе-



Рис. 4. Распределение плотности падающих радиационных потоков (опыт № 5 – в работе все пылесистемы).

ний — $11-19 \text{ кBr/m}^2$ (рис. 4). Также отметим, что при работе четырех пылесистем зафиксировано, что максимальный уровень плотности радиационных потоков, за счет их выравнивания, значительно ниже ($221-229 \text{ кBr/m}^2$), чем в опытах при отключении пылесистемы. И это несмотря на то, что в опыте 5 производительность котла по пару была наиболее высокой ($D = 0.94D_{\text{H}}$).

Как уже отмечалось, наличие тепловых неравномерностей в наиболее теплонапряженных горизонтальных сечениях топочной камеры может привести (при эксплуатации котла на номинальных по пару нагрузках) к появлению очагов шлакования и ухудшению из-за этого условий теплопередачи от продуктов сгорания к рабочему телу. Другим негативным следствием температурных неравномерностей является появление локальных максимальных радиационных потоков, которые превышают средний уровень на 16–20% в сечениях и до 61% по высоте. Вследствие этого резко интенсифицируется рост внутритрубных отложений в экранных поверхностях нагрева [14], что также ухудшает условия теплопередачи.

Наряду с характеристиками теплообмена в ходе экспериментальных измерений исследовался также состав уходящих из котла дымовых газов. Выявлено, что, несмотря на газовую сушку топлива и работу котла на нагрузках ниже номинальной, уровень вредных выбросов, зафиксированный в опытах, значительно превышает нормативный, который для этого класса котлов установлен в ГОСТ Р55173-2012 ниже 300 мг/м³. Так, зарегистрированные опытные величины концентрации оксидов азота составляют 522–888 мг/м³. Отметим, что полученный в экспериментах минимальный уровень NO_x обусловлен наименьшим расходом воздуха для горения ($\alpha = 1.2$), относительно



Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных плотности падающих радиационных потоков по высоте фронтового экрана при работе трех АБГ (а) и четырех АБВГ (б) пылесистем котла.

других опытов. В свою очередь, максимальная концентрация $C_{NO_x} = 888.2 \text{ мг/m}^3$ зарегистрирована в опыте 3, когда процесс сжигания производился в условиях наибольшего избытка воздуха ($\alpha = 1.45$). Результаты экспериментальных измерений состава дымовых газов приведены в табл. 4.

Таким образом, полученные в ходе экспериментальных измерений данные о значительных тепловых неравномерностях топочной камеры котла E-160 (по высоте и в сечениях) при различном сочетании работающих пылесистем, а также неудовлетворительные экологические показатели являлись основанием для проведения зональных исследований теплообмена для разработки мероприятий, направленных на совершенствование режимов энергетического сжигания.

На начальном этапе зонального исследования для возможной адаптации математической модели проводилось сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Для этого исходные данные для моделирования в части расходов топлива и воздуха соответствовали режимным параметрам эксплуатации во время проведения экспериментов. Результаты сопоставления показаны на рис. 5, где экспериментальные точки — это данные плотности падающих радиационных потоков, измеренные в лючках на оси фронтового экрана.

Из представленных на рис. 5 данных видно, что результаты моделирования показателей теплообмена удовлетворительно коррелируют с опытными данными. Абсолютная погрешность расчетных величин не превышает 3.1%, что находится в пределах погрешности проведенных измерений.

Номеропыта	Состав дымовых газов в точках отбора перед электрофильтрами								
помер опыта	O ₂ , %	α	CO, ppm	CO ₂ , %	NO _{<i>x</i>} , мг/нм ³				
1	3.1	1.2	10.8	10.1	521.8				
2	5.9	1.39	8.0	8.6	801.7				
3	6.5	1.45	12.0	8.2	888.2				
4	5.9	1.39	8.0	8.5	821.2				
5	4.9	1.31	10.3	9.1	831.6				

Таблица 4. Результаты измерений состава уходящих газов при работе котла Е-160-1.4-250 БТ

Зональное исследование температурных полей внутри топочного пространства, а также распределение плотности падающих на экраны радиационных потоков проводилось как при работе топки без отключения, так и при сочетании работающих пылесистем АБГ (отключена пылесистема В). Последнее, как уже отмечалось, приводит к прекращению работы соответствующего блока горелок, в который для охлаждения горелочных устройств подают только 10% от общего объема воздуха. Топливо, воздух и газы рециркуляции при отключении направляются в равных долях в работающие блоки горелок.

Для снижения выявленных в ходе проведенных экспериментов тепловых неравномерностей исследовалось возможность рационального распределение топливно-воздушной смеси как по ярусам горелок, так и по отдельным горелочным блокам. Изменить в этом случае режимные параметры сжигания на действующем котле достаточно несложно за счет соответствующей настройки пыледелителя при распределении топливно-воздушной смеси по ярусам или за счет изменения токовой нагрузки на двигатель мельницы вентилятора индивидуальной системы пылеприготовления при изменении расхода топлива по работающим горелочным блокам.

Для анализа предлагаемых режимных изменений использовалась разработанная многозонная математическая модель теплообмена в топке котла E-160. Так, при зональном моделировании исследовались поля температур и тепловых потоков при следующих распределениях топлива и воздуха между ярусами горелок, а именно, с большей загрузкой горелок нижнего (первого яруса горелок): 1 вариант (базовый) — 50 на 50%; 2 вариант — 40 на 60%; 3 вариант — 30 на 70%. Дальнейшая загрузка топливом горелок нижнего яруса нецелесообразна из-за возможной сепарации угольных частиц в низ и на скаты холодной воронки, несмотря на организацию нижнего дутья. При этом рассматривался режим сжигания с параметрами (табл. 2) и работой четырех пылесистем. Распределение показателей теплообмена для трех вариантов расчета представлено на рис. 6.

Необходимо отметить, что при зональном математическом моделировании теплообмена производился также расчет концентрации оксидов азота в дымовых газах. Для этого использовался подход, изложенный в [15].

Как видно из кривых, на рис. 6 для базового варианта расчета (вариант 1) в соответствии с принятыми при моделировании режимными параметрами сжигания (D = 160 т/ч, $\alpha = 1.2$), за счет повышения расхода топлива и уменьшения количества воздуха, направляемого в топочную камеру, по сравнению с режимом, установленным на котле во время проведения опытов (D = $0.94D_{\rm H}$, $\alpha = 1.31$), при росте общего температурного уровня газов, максимальное значение плотности падающих радиационных потоков возросло с 224 кВт/м² (рис. 56) до 240 кВт/м². Температура газов в центре на уровне второго яруса горелок при этом составила 1384°С. Приведение в соответствие с требованиями режимных карт значений избытка воздуха вызвало, как и ожидалось, снижение расчетного значения концентрации оксидов азота в дымовых газах до уровня С_{NO_x} = 607.2 мг/м³, что значительно превышает нормативные требования, но на ~27% меньше величины, зафиксированной в экспериментах (опыт 5).

При сравнении показателей теплообмена, полученных для трех вариантов расчета распределения топливно-воздушной смеси между нижним и верхним ярусами горелок, можно отметить следующее. Наиболее благоприятным, с точки зрения сокращения тепловых неравномерностей по высоте, является вариант 2, когда распределение топлива между ярусами составило: 60% (нижний) и 40% (верхний). В этом случае зафиксировано снижение максимальной плотности радиационного потока до 225 кВт/м². Также отмечено и более равномерное заполнение газами зоны активного горения, температура которых выравнивается со снижением максимума на 49°С. Суммарные характеристики теплообмена при этом практически не изменились. Например, температура

91



Рис. 6. Распределение показателей теплообмена по высоте топочной камеры для трех вариантов расчета распределения топлива между ярусами горелок.

газов на выходе из топки (на входе в ширмовый пароперегреватель) для вариантов расчета 1 и 2 составила соответственно 1002°С и 998°С.

Из результатов моделирования видно (рис. 6), что дальнейшее увеличение загрузки топливом горелок нижнего яруса (вариант 3) приводит к появлению уже на этом уровне по высоте максимальных значений показателей теплообмена, а именно: температуры газов — 1379°С и плотности падающего радиационного потока — 242 кВт/м². Поэтому такое распределение топлива в качестве режимных параметров сжигания не может быть рекомендовано к применению в реальных условиях эксплуатации котла E-160.

Сопоставление показателей теплообмена для симметричного положения факела относительно центра (в работе четыре пылесистемы) и при его смещении представлено на рис. 7.

Из сопоставления результатов зонального моделирования (рис. 6) видно, что температуры газов в центральном слое в случае отключения блока горелок особенно в зоне активного горения заметно ниже ~ $65-70^{\circ}$ С, чем при работе котла без отключения. Это вызвано тем, что при прекращении подачи топлива и воздуха в блок горелок происходит смещение факела в его сторону. В опытах это проиллюстрировано распределением плотности падающих радиационных потоков. На рисунке 6 это отчетливо видно на примере распределения температур газов в пристенных слоях, примыкающих к соответствующему экрану. Так, максимальные температуры газов зафиксированы, помимо центральной зоны, где располагается ядро горения, и в пристенных зонах, примыкающих к блоку горелок перед отключенным против направления кругового движения дымовых газов. В моделируемом случае с отключением блока горелок В это зоны пристенного слоя фронтового экрана и левого бокового экрана топки. Минимальные значения зафиксированы в пристенных зонах правого бокового и тылового



Рис. 7. Расчетное распределение температур газов по высоте топки при отключении пылесистемы В (а) и при работе всех пылесистем (б) в зонах центрального слоя и в зонах пристенного слоя, примыкающих к соответствующему экрану.

экранов. В случае работы топки без отключения температуры в пристенных зонах экранов практически не отличаются, что характеризует симметричного положение высокотемпературного факела.

При моделировании тепловой работы топочной камеры с отключением блока горелок получено, что концентрация оксидов азота в дымовых газах в этом случае заметно ниже $C_{NO_x} = 547.1 \text{ мг/m}^3$, чем при рассмотренном ранее – без отключения. Последнее объясняется не только некоторым снижением максимальных температур, но и, главное, тем что воздух для сжигания подается как в работающие, так и в неработающие горелки для их охлаждения. Тогда, с учетом воздуха нижнего дутья, коэффициент избытка воздуха в горелках снижается с $\alpha_r = 1.10-1.15$ (режим без отключения) до $\alpha_r = 0.95-1.01$ (режим с отключением). Такое изменение подачи воздуха обеспечивает ступенчатость сжигания угольной пыли и пониженное содержание оксидов азота в дымовых газах. Кроме того, при режиме с отключением, количество газов рециркуляции, направляемых в блоки горелок, увеличивается, поскольку в отключенные горелки они не подаются, что также оказывает воздействие на снижение C_{NO_x} .

Для сокращения тепловых неравномерностей в пределах зоны активного горения топлива, где происходит формирование высокотемпературного тангенциального вихревого движения газовых потоков, рассматривались варианты по перераспределению топлива между работающими блоками горелок в случае отключения одного из них. В настоящее время в условиях эксплуатации котла E-160 топливно-воздушная смесь по работающим блокам горелок распределяется в равных долях.

Расходы топлива по горелочным блокам несложно оперативно изменять в ходе управления работой котлоагрегата путем регулирования токовой нагрузкой на привод



Рис. 8. Распределение плотности падающих радиационных потоков по экранам топочной камеры при равной подаче топлива (а) и при его распределении по блокам горелок (б).

двигателя мельницы-вентилятора, которыми оборудованы индивидуальные пылесистемы прямого вдувания. При этом наиболее рациональным будет снижение расхода топлива в блок горелок, расположенный перед отключенным против кругового хода движения газового потока, и, соответственно, увеличение расхода топлива, направляемого в следующий от отключенного по ходу движения газов блок горелок. Для обеспечения суммарного тепловыделения в топочной камере общий расход топлива на котел остается постоянным.

Результаты многовариантных расчетов при зональном моделировании теплообмена для предложенного распределения топлива по работающим горелочным блокам для котла мощностью 500 т/ч представлены в [16]. В настоящем исследовании при моделировании использовались представленные там расчетные соотношения. Так, устанавливались следующие расходы топлива по горелочным блокам при схеме включения АБГ (отключена В) в работу пылесистем котла E-160. При общем расходе топлива 7.35 кг/с, по блокам горелок: $\Gamma - 3.025$ кг/с; A - 2.408 кг/с; B - 1.917 кг/с. Расчетное распределение плотности падающих радиационных потоков для указанного распределения топлива и для случая равной подачи представлено на рис. 8.

Анализ результатов зонального моделирования теплообмена показал следующее. При отключении одной из пылесистем котла и равной подаче топливно-воздушной смеси в блоки горелок наблюдается высокая тепловая неравномерность. Так, разница между максимальными значениями плотности падающих радиационных потоков на фронтовом и правом экранах топочной камеры (рис. 8а) при отключении блока горелок В составила 82 кВт/м². В экспериментальных измерениях (опыт 2) зафиксирована разница 84 кВт/м². При этом наибольшие значения плотности падающих радиацион-

ных потоков отмечены на фронтовом экране, а наименьшие – на правом боковом. На тыловом и левом боковом экранах величины радиационных потоков примерно одинаковы.

Принятое при зональном моделировании распределение топлива по горелочным блокам позволило резко уменьшить тепловую неравномерность между экранами в зоне активного горения до 29 кВт/м². При этом максимальная плотность падающих на фронтовой экран радиационных потоков снизилась с 264 до 248 кВт/м². Суммарные показатели теплообмена, такие как температура дымовых газов на выходе из топки и общее тепловосприятие экранов, остались без изменения.

Другим положительным моментом, помимо сокращения тепловой неравномерности, полученное при моделировании ситуации с отключением блока горелок В и с принятым распределением топливно-воздушной смеси в работающие блоки горелок, явилось снижение в этом случае концентрации оксидов азота в уходящих газах. Так, зафиксированное в расчетах значение составило: $C_{NO_x} = 502.7 \text{ мг/м}^3$. Последнее объясняется тем, что в этом случае происходит выравнивание температурного поля в горизонтальных сечениях зоны активного горения.

выводы

1. В ходе проведенных экспериментальных измерений в топке котла Е-160 Железногорской ТЭЦ при вихревом тангенциальном сжигании ирша-бородинского угля выявлены следующие негативные особенности протекания топочных процессов. Установлено наличие по высоте топки тепловых неравномерностей с зафиксированными максимумами плотности падающих радиационных потоков на уровне верхнего яруса горелок – 258–266 кВт/м². Также зафиксированы тепловые неравномерности в горизонтальных сечениях топки – 64–84 кВт/м², причиной возникновения которых является эксплуатация котла на трех индивидуальных пылесистемах прямого вдувания. Кроме того, в ходе опытов получено, что эксплуатация котла с избытками воздуха в топке $\alpha = 1.31-1.45$ приводит к повышенным концентрациям оксидов азота в уходящих газах: 801.7–888.2 мг/м³.

2. Для разработки технических предложений, направленных на сокращение выявленных при экспериментах негативных особенностей тепловой работы топки, использовалась 123-зоннная математическая модель теплообмена. При моделировании радиационного и сложного теплообмена проводился также расчет концентрации оксидов азота в дымовых газах. Сопоставление расчетных и опытных данных в части распределения плотности падающих на экраны радиационных потоков выявило их удовлетворительную сходимость.

3. Из результатов зонального моделирования теплообмена получено, что распределение топлива между ярусами горелок с загрузкой нижнего яруса в количестве 60% от общего расхода топлива, направляемого для сжигания при номинальной производительности котла, позволяет значительно сократить тепловую неравномерность по высоте топки. Так, превышение максимума плотности падающих радиационных потоков на уровне второго яруса горелок над средним их значением снизилось с 1.51 до 1.41.

4. Для сокращения тепловых неравномерностей в горизонтальных сечениях зоны активного горения проводилось зональное моделирование теплообмена с разной загрузкой топливно-воздушной смесью блоков горелок в зависимости от схемы работы пылесистем котла. В результате проведенных зональных исследований теплообмена получено, что предлагаемое распределение топливно-воздушной смеси между работающими горелочными блоками позволяет воздействовать на положение высокотемпературного тангенциального факела. Это сокращает тепловые неравномерности между экранами топки с 82 до 29 кВт/м². 5. Предложенные технические мероприятия по сокращению тепловых неравномерностей позволят обеспечить бесшлаковочные условия эксплуатации котла E-160 при номинальной паровой нагрузки, а также воздействовать на предотвращение образования внутритрубных отложений в экранных поверхностях нагрева. Другим положительным аспектом является снижение выбросов оксидов азота на 8–10%, хотя и в этом случае их значения превышают нормативный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Gu Mingyan, Wang Mingming, Chen Xue et al.* Numerical study on the effect of separated over-fire air ratio on combustion characteristics and NOx emission in a 1000 MW supercritical CO₂ boiler, Wang Jimin, Lin Yuyu, Chu Huaqiang // Energy. 2019. 175. P. 593–603.
- 2. Luo Kun, Zhao Chunguang, Wen Xu et al. A priori study of an extended flamelet/progress variable model for NO prediction in pulverized coal flames // Energy. 2019. 175. P. 768–780.
- Tian Dengfeng, Zhong Lijin, Tan Peng et al. Influence of vertical burner tilt angle on the gas temperature deviation in a 700 MW low NO_x tangentially fired pulverised-coal boiler // Fuel Processing Technology. 2015. 138. P. 616–628.
- 4. Peterseim J., Hellwig U. Increasing availability and minimising fouling in waste-to-energy plants Innovative boiler design options // VGB PowerTech. 2015. 95. № 10. P. 49–52.
- 5. Zhao Huirong, Shen Jiong, Li Yiguo et al. Coal-fired utility boiler modelling for advanced economical low-NOx combustion controller design // Control Engineering Practice. 2017. 58. P. 127–141.
- 6. *Du Yongbo, Wang Changan, Lv Qiang et al.* CFD investigation on combustion and NOx emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler under high temperature and strong reducing atmosphere // Applied Thermal Engineering. 2017. 126. P. 407–418.
- 7. Chen Shinan, He Boshu, He Di et al. Numerical investigations on different tangential arrangements of burners for a 600 MW utility boiler // Energy. 2017. 122. P. 287–300.
- 8. *Иваницкий М.С.* Влияние режимных характеристик топочной камеры пылеугольного котла на выход токсичных соединений // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 1. С. 5–9.
- 9. Шишканов О.Г. Экспериментальное исследование тепловых неравномерностей в тангенциальной топке котла Е-160-1,4-250 БТ Железногорской ТЭЦ // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием "Горение топлива: теория, эксперимент, приложения"; 16–18 ноября 2015. Новосибирск; 2015. Доступно по: http://www.itp.nsc.ru/ conferences/gt-2015/. Ссылка активна на 03 ноября 2020.
- 10. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжов Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
- Алексеенко С.В., Срывков С.В., Процайло М.Я. и др. Экспериментальное исследование закрученного потока в камере квадратного сечения // Межвуз. сб. науч. трудов: Моделирование теплофизических процессов. Красноярск: Изд-во Красн. ун-та, 1989. С. 33–53.
- 12. Кузнецов Н.В., Митор В.В. и др. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). М.: Энергия, 1973. 295 с.
- 13. Алехнович А.Н. О выборе характеристик пылеугольной топки с позиций шлакования // Электрические станции. 2016. № 12. С. 2–11.
- 14. Петрова Т.И., Кашинский В.И., Макрушин В.Н. и др. Влияние теплового потока на скорость образования отложений продуктов коррозии железа и меди в котлах // Теплоэнергетика. 2008. № 7. С. 2–5.
- 15. Шишканов О.Г., Андруняк И.В. Учет генерации оксидов азота при зональном моделировании теплообмена в пылеугольных топках // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 3(84). С. 36–42.
- 16. Шишканов О.Г., Андруняк И.В. Снижение температурных неравномерностей в объеме тангенциальной топки котла E-500 // Электрические станции. 2008. № 3. С. 23–28.

Improving the Operating Parameters of the E-160 Boiler When Burning Irsha-Borodino Coal

O. G. Shishkanov*

National research University "MPEI", Moscow, Russia *e-mail: shishkanovoleg@yandex.ru

The article presents the results of experimental measurements and zonal mathematical modeling of heat transfer in the furnace chamber of the E-160 boiler during the torchlight tangential combustion of Irsha-Borodino coal. A high level of thermal irregularities both in height and in the sections of the furnace chamber was revealed. In addition, it was found that the content of nitrogen oxides in flue gases exceeds the regulatory requirements. To improve the operating parameters of the boiler, in terms of ensuring slagging-free conditions for carrying the nominal load and preventing the growth of in-line deposits in the heating screen surfaces, the author proposed rational fuel distribution schemes between the tiers of burners, as well as for the burner blocks when one of the individual direct injection pulverized-coal systems is disabled.

Keywords: E-160 steam boiler, tangential combustion chamber, burners, individual pulverized-coal systems, experimental measurements, zonal mathematical model of heat transfer, nitrogen oxides