

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ НИЗКОКАЛОРИЙНОГО ГАЗА, ПОЛУЧАЕМОГО ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Д.А. Мельников, А.А. Сомов*

** Всероссийский дважды ордена трудового красного знамени теплотехнический научно-исследовательский институт, Россия, Москва, aasomov@vti.ru*

Аннотация. Описаны результаты математического исследования работы энергетического газомазутного котла при сжигании в нем низкокалорийного газа, получаемого при газификации твердого топлива. Показано, что обеспечение проектных показателей котла при этом возможно и не потребует осуществления мероприятий по реконструкции поверхностей нагрева и изменению его тепловой схемы. Установлено, что при полном переходе на низкокалорийный газ возможно возникновение трудностей с воспламенением топлива в связи с пониженным уровнем температур в топке.

Ключевые слова: газомазутный котел, непроектное топливо, продукты газификации угля.

STUDIES OF THE FURNACE COMBUSTION SYNGAS IN BOILERS

D.A. Melnikov, A.A.Somov*

** ALL-RUSSIA THERMAL ENGINEERING INSTITUTE, Russia, Moscow, aasomov@vti.ru*

Annotation. The results of mathematical analysis of combustion of syngas in gas-and-oil-fired boiler. Project provision of boiler can be achieved without reconstruction boiler.

Keywords: gas-and-oil-fired boiler, syngas, gasification.

В течении последних нескольких лет сотрудники ВТИ разрабатывают первую отечественную парогазовую установку с внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ с ВЦГ), которая будет использована в качестве основы для строительства новых энергообъектов, а также модернизации существующих ТЭС. ПГУ с ВЦГ сооружается на базе горнового газификатора плотного слоя с жидким шлакоудалением, расчетные параметры работы которого представлены в таблице 1.

На этапе освоения газификатора, получаемый низкокалорийный газ предполагается использовать в энергетическом котле Е-160-2,4-250-БТ ст. №5 Томской ТЭЦ-3 Котел Е-160-2,4-250 однобарабанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, выполнен по П-образной компоновке, газоплотного исполнения имеет номинальные параметры работы представленные в таблице 2. Разрешена эксплуатация котла (после испытаний пароперегревателя) при температуре перегретого пара до 300°C. Топка призматической формы с размерами в свету 9200x7400 мм с тангенциально-угловым расположением четырех реконструированными для сжигания газа и мазута горелками. Каждая горелка имеет три канала для подвода воздуха и три трубы для мазутных форсунок производительностью 1000 кг/ч. Производительность одной горелки по газу составляет 2925 м³/ч. Для подогрева холодного воздуха предусмотрена рециркуляция горячего воздуха и два паровых калорифера. Удаление дымовых газов из котла осуществляется одним дымососом ДН 24x2-0,62.

Таблица 1. Параметры работы горнового газификатора.

Показатель	ед. изм.	Значение	
		номинал	испытания
Проектное топливо		кузнецкий уголь марки Т	
Расход сырого угля	т/ч	7,0	4,0
Расход сухого воздуха	тыс. нм ³ /ч	19,2	10,8
Расход пара	т/ч	1,2	0,7
Расход газа	тыс. нм ³ /ч	30,6	19,6
Состав газа:			
СО	% об.	26,0	23,0
СО ₂	% об.	2,4	2,1
СН ₄	% об.	0,9	0,8
Н ₂ S	% об.	0,04	0,03
Н ₂	% об.	9,0	8,0
Н ₂ O	% об.	11,7	21,8
N ₂	% об.	49,6	43,8
NH ₃	% об.	0,3	0,27
Теплота сгорания	МДж/м ³	4,6	4,1
Плотность газа	кг/м ³	1,10	1,07
Запыленность	гр/м ³	0,02	180

Таблица 2. Параметры работы котла Е-160-2,4-250БТ.

Паропроизводительность	160 т/ч
Давление пара в барабане	2,94 МПа
Давление перегретого пара	2,35 МПа
Температура перегретого пара	250°С
Температура питательной воды	104°С
Расход газа при $Q_i^d = 36,8$ МДж/нм ³	11 200 нм ³ /ч
Расход мазута при $Q_i^d = 39,8$ МДж/кг	10,3 т/ч

С помощью программы Boiler Designer составлена математическая модель котла и проведена ее верификация по данным заводского расчета и данным режимно-наладочных испытаний. С помощью полученной модели проведены расчетные исследования по определению возможности сжигания в нем генераторного газа с частичным и полным замещением проектного топлива на нагрузках 100 % и 50 %.

Для анализа возможности утилизации в котле ст. №5 Томской ТЭЦ-3 требуемого количества генераторного газа была составлена расчетная модель котла. При этом в качестве исходных данных использовалась инструкция по эксплуатации, техническое описание котла, а также конструкторская документация завода-изготовителя. Верификация и настройка модели на следующем этапе осуществлялась посредством сопоставления модельных данных с данными заводского расчета котла на номинальной нагрузке 160 т/ч. В качестве топлива использовался природный газ с теплотой сгорания 36,84 МДж/м³ (8800 ккал/нм³). При этом в соответствии с заводскими данными устанавливались режимные параметры работы котла, расход топлива, составляющие тепловых потерь, коэффициенты тепловой эффективности, загрязнения, использования и т.д. В таблице 3 даны заводских и расчетных данных.

Анализ полученных данных выявляет хорошую сходимость параметров, как по пароводяному, так и по газозоудшному трактам котла. Имеющиеся незначительные расхождения обусловлены в основном следующими обстоятельствами:

- отличием в расчете тепловосприятности испарительных ширм;

- некорректным моделированием фестона в рамках заводского расчета;
- упрощённым представлением характера тока среды в потолочном пароперегревателе в заводском расчете;
- неточным заводским расчетом поглощения излучения из топки.

Таблица 3. Сравнение данных модели и данных заводского расчета

Параметр	Разм.	Расчет	
		завод	модель
Расход острого пара	т/ч	160	159,3
Давление острого пара	кгс/см ²	25,4	
Температура острого пара	°С	252	253,7
Расход питательной воды	т/ч	168	167,3
Температура питательной воды	°С	104	
Температура пара за котлом (после впрыска)	°С	252	256
Адиабатная температура горения	°С	2099	2092
Температура газов на выходе из топки	°С	914	915
Температура уходящих газов	°С	109	110,5
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за топкой	-	1,05	
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за котлом	-	1,18	
Полный расход топлива на котел	нм ³ /ч	11200	
КПД котла брутто	%	95	94,84

Указанные выше факторы, в частности, предопределили несколько большую температуру перегретого пара за котлом (на примерно 2 °С) и несколько меньшую паропроизводительность котла (на примерно 0,7 т/ч) при заданном расходе топлива по модельным данным в сравнении с результатами заводского расчета.

Дальнейшая настройка расчетной модели осуществлялась по опытным данным работы котла [3]. В качестве топлива использовался природный газ с теплотой сгорания 35,13 МДж/м³ (8390 ккал/нм³). Все исходные данные для модели устанавливались согласно данным испытаний. Сопоставление расчетных и опытных данных приведено в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение расчетных параметров работы котла с данными режимно-наладочных испытаний.

Параметр	Разм.	Опытные данные	Расчет по модели
Расход острого пара	т/ч	152	152,9
Давление острого пара	кгс/см ²	14,0	25,4
Температура острого пара	°С	282	284,5
Расход питательной воды	т/ч	-	154,6
Температура пара за котлом (после впрыска)	°С	282	285
Адиабатная температура горения	°С	-	2070
Температура газов на выходе из топки	°С	-	918
Температура уходящих газов	°С	121	121,4
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за топкой	-	1,02	
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за котлом	-	1,13	
Полный расход топлива на котел	нм ³ /ч*	11700	
КПД котла брутто	%	93,94	94,25

* расход указан при 0 °С и 101325 Па.

Анализ полученных результатов выявляет хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Некоторое расхождение имеет место лишь по газовому тракту в области поворотной камеры и может быть вызвано известной погрешностью измерения температур газов в высокотемпературной области. Меньшее значение

температуры горячего воздуха по данным модели может быть вызвано несколько завышенным расходом воздуха на рециркуляцию в связи с возможной погрешностью в измерении температуры воздуха за точкой его смешения с холодным потоком. Стоит отметить, что для получения представленных данных потребовалась лишь незначительная настройка модели в части корректировки коэффициентов тепловой эффективности КПП и ЭК П, что является вполне допустимым. Хорошее совпадение модельных и экспериментальных данных дает основание для использования построенной адекватной расчетной модели в качестве инструмента прогнозирования и анализа поведения котла Е-160-2,4-250-БТ ст. №5 при его частичном или полном переводе на сжигание генераторного газа.

Существующий опыт перевода различных котлов на сжигание продуктов газификации свидетельствует о том, что подача в топку котла низкокалорийного забалластированного газообразного топлива сопровождается увеличением объема продуктов сгорания, снижением интенсивности выгорания, уровня температур, интенсивности радиационного теплообмена и падающих тепловых потоков в топочной камере. В результате тепловосприятие топки снижается, а избыточная тепловая мощность выносится с продуктами сгорания в газоходы котла. Если при этом котел имеет выраженную конвективную характеристику пароперегревателя, ввиду больших объемов продуктов сгорания и скоростей газов в поверхностях, тепловосприятие пароперегревательного тракта резко возрастает, и дальнейшее увеличение доли низкокалорийного топлива становится недопустимым в связи с ростом температуры острого пара и с невозможностью ее поддержания системой регулирования котла (даже при максимальном впрыске). Если же, пароперегреватель котла имеет радиационную характеристику с расположением поверхностей нагрева в объеме топки, то ввиду снижения ее тепловосприятия температура острого пара снижается, и дальнейшее увеличение доли низкокалорийного топлива становится недопустимым в связи с невозможностью ее поддержания системой регулирования котла (даже при нулевом впрыске).

Специфика рассматриваемого котла Е-160-2,4-250-БТ заключается, во-первых, в слабой выраженности пароперегревательного участка тракта в целом, а во-вторых, в наличии в пределах этого тракта как преимущественно радиационных (потолочный ПП), так и конвективных (КПП) поверхностей нагрева. При этом, хотя поверхность нагрева потолочного пароперегревателя вдвое превышает поверхность КПП и его тепловосприятие в номинальном режиме выше на 50 %, доля тепловосприятия потолка за счет конвективной составляющей также значительна, в особенности в области газоходов ширм и КПП. Таким образом, пароперегревательные поверхности нагрева данного котла работают в условиях смешанного теплообмена, что обуславливает низкую чувствительность параметров перегрева к подаче низкокалорийного топлива и предопределяет, по существу, нейтральную характеристику пароперегревателя со слабовыраженной конвективной динамикой.

Построенная модель котла была дополнена опцией, моделирующей подачу в топку генераторного газа, при этом исследовались режимы работы котла на полной и

50 % нагрузке, с полной и частичной заменой природного газа генераторным. Результаты расчета котла в этих режимах представлены на в таблице 5 и 6.

Таблица 5. Расчетные параметры работы котла на генераторном газе при нагрузке 100 %.

Параметр	Размерность	Значение	
Доля (по теплу) генераторного газа	%	20	100
Расход острого пара	т/ч	153,1	153,2
Давление острого пара	кгс/см ²	25,4	
Температура острого пара	°С	285	287
Расход питательной воды	т/ч	154,8	154,9
Температура пара за котлом (после впрыска)	°С	285	287
Адиабатная температура горения	°С	2016	1841
Температура газов на выходе из топки	°С	926	945
Температура уходящих газов	°С	128	161
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за топкой	-	1,02	
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за котлом	-	1,13	
Расход генераторного газа	нм ³ /ч*	5,42	24,36
Расход природного газа	нм ³ /ч*	2,52	0
КПД котла брутто	%	93,73	91,32

* расход указан при 0 °С и 101325 Па.

Таблица 6. Расчетные параметры работы котла на генераторном газе при нагрузке 50%.

Параметр	Размерность	Значение	
Доля (по теплу) генераторного газа	%	40	100
Расход острого пара	т/ч	80,1	80,1
Давление острого пара	кгс/см ²	18,35	
Температура острого пара	°С	271	272
Расход питательной воды	т/ч	81,75	82,27
Температура пара за котлом (после впрыска)	°С	271	272
Адиабатная температура горения	°С	1917	1800
Температура газов на выходе из топки	°С	681	704
Температура уходящих газов	°С	105	120
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за топкой	-	1,02	
Коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за котлом	-	1,13	
Расход генераторного газа	нм ³ /ч*	5,42	12,42
Расход природного газа	нм ³ /ч*	0,94	0
КПД котла брутто	%	94,72	93,46

* расход указан при 0 °С и 101325 Па.

На номинальной нагрузке, наблюдается лишь незначительное повышение температуры перегретого пара, связанное со снижением радиационного теплообмена в топке и первых по ходу газового тракта поверхностях нагрева и повышением конвективной составляющей. Поскольку для данного котла характерен смешанный механизм теплообмена в пароперегревательных поверхностях, в рассмотренных режимах отмечается значительная устойчивость параметров перегрева и гибкость работы котла к изменениям в топливном балансе. Вынесенная из топки с продуктами сгорания избыточная тепловая мощность лишь в малой степени воспринимается пароперегревательными поверхностями соединительного газохода и в значительной мере передается далее по газовому тракту в конвективную шахту котла. Здесь интенсификация конвективного теплообмена является существенной (как за счет больших объемов продуктов сгорания, так и за счет большего уровня температур

газов ввиду менее интенсивного охлаждения больших объемов продуктов сгорания по глубине газового тракта), а именно:

- возрастает тепловосприятие экономайзера, и он становится кипящим в режиме со 100 % подачей генераторного газа. Хотя процент кипения на горячем конце экономайзера и незначителен (2,5 %), все он сопряжен с некоторыми рисками расслоения потока в горизонтальных трубах его пакетов, а также с неравномерностью раздачи среды по отводящим трубам;

- возрастает температура горячего воздуха с 295 °С в исходном режиме до 315 °С и 395 °С при доле генераторного газа 20 % и 100 % соответственно. Хотя прирост в 100 °С является весьма значительным, указанный уровень температур не является критическим по условиям отсутствия окалинообразования трубной доски воздухоподогревателя и вполне допустим;

Часть избыточной тепловой мощности, не воспринятая в конвективной шахте, неизбежно выносится из котла, обуславливая соответствующие тепловые потери с уходящими газами. Так, в рассмотренных режимах температура уходящих газов в сравнении с исходным режимом сжигания природного газа возросла на 7 °С и 40 °С, что влечет снижение КПД котла на 0,52 % и 2,93 % соответственно.

На 50 % нагрузке при подаче в котел генераторного газа удается обеспечить температуру пара на уровне 271-272 °С без впрыска питательной воды. Вместе с тем, рассмотренные режимы характеризуется значительным понижением уровня температур в топке, а также температуры горячего воздуха, что может сопровождаться трудностями с воспламенением низкокалорийного топлива, особенно в режимах с полным исключением природного газа. Однако, с увеличением доли генераторного газа в топливном балансе растет и температура горячего воздуха, что частично компенсирует меньшую химическую активность забалластированного топлива. Стоит отметить, что на пониженной нагрузке в рассмотренных режимах КПД котла возрастает до 94,72 и 93,46 при доле ГГ 40 % и 100 % соответственно.

Выводы

Проведено расчетное исследование работы котла на номинальной и 50 % нагрузке при частичном и полном вытеснении исходного топлива генераторным газом. Установлено, что обеспечение проектных показателей котла в этих режимах возможно и не потребует осуществления мероприятий по реконструкции поверхностей нагрева и изменению тепловой схемы котла. Основные издержки от утилизации низкокалорийного топлива связаны с незначительным парообразованием на горячем конце экономайзера, а в технико-экономическом – с незначительным снижением КПД котла. Целесообразность использования генераторного газа для замены природного может быть установлена при выполнении экономических расчетов стоимости эксплуатации газификационной установки.