

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.18.01

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВОГО КОТЛА ТИПА КЕ ПРИ СЖИГАНИИ НИЗКОСОРТНОГО ТОПЛИВА

М.В. Савина, Э.Т. Ндлову, Г.Р. Мингалеева

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

pmv_83@mail.ru, ndlovutinashel20@gmail.com, mingaleeva-gr@mail.ru

Резюме: В статье рассматривается возможность сжигания такого низкосортного топлива, как торф и багасса. Багасса является отходом агрохозяйства за рубежом и требовала раньше утилизации. Были проведены расчеты тепловой эффективности в условиях слоевого сжигания в маломощном паровом котле типа КЕ. Полученные результаты показали возможность использования паровых котлов типа КЕ при сжигании таких биотоплив как багасса с потенциальным энергетическим эффектом, а именно компоновки ТЭЦ малой мощности, вырабатывающих электроэнергию на основе данного топлива.

Ключевые слова: торф, багасса, низкосортное топливо, паровой котел малой мощности, слоевое сжигание.

ESTIMATION OF EFFICIENCY STEAM BOILER TYPE KE IN COMBUSTION OF LOW GRADE FUEL

MV. Savina, ET. Ndlovu, GR. Mingaleeva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

pmv_83@mail.ru, ndlovutinashel20@gmail.com, mingaleeva-gr@mail.ru

Abstract: The article considers the possibility of burning such low-grade fuel as peat and bagasse. Bagasse is agricultural waste and demanded earlier disposal. Thermal efficiency calculations were made of under the conditions of layer combustion in a low-power steam boiler KE type. The results showed the possibility of using steam boilers KE type when burning biofuels such as bagasse with a potential energy effect, namely the layout of low-power CHP plants that generate electricity based on this fuel.

Keywords: peat, bagasse, low-grade fuel, low-power steam boiler, bed burning.

Введение

В настоящее время актуальным является использование для автономного производства тепловой и электрической энергии различных низкосортных топлив, не востребованных централизованной энергетикой, в которой предъявляются достаточно строгие требования к стабильности состава и свойств топлива.

Низкосортное топливо отличается высоким содержанием золы, влаги и соответственно низкой теплотворной способностью. К таким топливам в первую очередь относятся торф, горючие сланцы и бурые угли, в связи с чем использование их в топливно-энергетическом балансе минимально из-за высоких затрат на предварительную сушку.

Небольшие котельные и мини-ТЭС, которое изначально проектировались на слоевое сжигание угля, могут быть частично или полностью переведены на использование менее качественных топлив, например, торфа и определенных видов биомассы. Однако для обоснования возможности такого перехода необходимо провести расчет котельного агрегата для определения показателей его эффективности. В связи с этим целью настоящей работы является обоснование возможности и оценка эффективности работы парового котла малой мощности при сжигании низкосортных топлив. Результаты расчетов представлены для котла типа КЕ производства ОАО «Бийский котельный завод», который может

использоваться на промышленных и коммунальных котельных, а также в составе когенерационных установок для мини-ТЭС.

Теоретические основы

Анализ состава и свойств низкосортных топлив

Основные низкосортные топливные ресурсы в мире, которые доступны в достаточном количестве для продолжительного и устойчивого использования, включают биомассу, торф, горючий сланец, нефтеносные пески, отходы углеобогащения, бурые угли, нефтяной кокс и др.

Биомасса является топливом низкого качества, но привлекает значительное внимание как ресурс в течение последних двадцати лет благодаря своей нейтральной в отношении выбросов энергии. Кроме того, при сжигании биомассы решается проблема утилизации отходов [1]. Биомасса обычно представляет собой растительное вещество, которое выращивается специально для производства электроэнергии или тепла. Основные компоненты биомассы - это углерод, водород и кислород. Азот и небольшие количества других веществ, в том числе щелочи, щелочноземельные и тяжелые металлы также могут быть в составе биотопливных ресурсов. Последние оценки доступности биомассы Всемирным энергетическим советом (2013 г.) были сделаны с учетом того, что источниками являются древесина (естественные леса) и сельскохозяйственные культуры. Согласно статистике, представленной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (FAO), около 1,5 млрд. га, что соответствует примерно 12% площади земного шара в мире, используется для растениеводства, при этом менее 0,01% сельскохозяйственных земель используется для производства биотоплива, источниками которого в основном являются сахарный тростник, кукуруза и корнеплоды¹.

Многочисленные и разнообразные источники биомассы, а также широкий спектр условий, при которых растительный материал образуется, означает, что свойства потенциального топлива могут варьироваться очень значительно. В табл. 1 представлен сравнительный анализ свойств, характеризующих биомассу как топливо.

Таблица 1

Состав и свойства различных видов биомассы²

	Люцер-на	Пшенич-ная солома	Рисо-вая шелуха	Рисо-вая солома	Просо	Багасса	Древеси-на вербы	Гибрид-ный тополь
Состав топлива, % на сухую массу								
Связанный углерод	15,81	17,71	16,22	15,86	14,34	11,95	16,07	12,49
Летучие вещества	78,92	75,27	63,52	65,47	76,69	85,61	82,22	84,81
Зола	5,27	7,02	20,26	18,67	8,97	2,44	1,71	2,70
Элементный анализ, % на сухую массу								
Углерод	47,17	44,92	38,83	38,24	46,68	48,64	49,90	50,18
Водород	5,99	5,46	4,75	5,20	5,82	5,87	5,90	6,06
Кислород	38,19	41,77	35,47	36,26	37,38	42,82	41,80	40,43
Азот	2,68	0,44	0,52	0,87	0,77	0,16	0,61	0,60
Сера	0,20	0,16	0,05	0,18	0,19	0,04	0,07	0,02
Хлор	0,50	0,23	0,12	0,58	0,19	0,03	<0,01	0,01
Зола	5,27	7,02	20,26	18,67	8,97	2,44	1,71	2,70
Элементный состав золы, %								
SiO ₂	5,79	55,32	91,42	74,67	65,18	46,61	2,35	5,90
Al ₂ O ₃	0,07	1,88	0,78	1,04	4,51	17,69	1,41	0,84
TiO ₂	0,02	0,08	0,02	0,09	0,24	2,63	0,05	0,30
Fe ₂ O ₃	0,30	0,73	0,14	0,85	2,03	14,14	0,73	1,40
CaO	18,32	6,14	3,21	3,01	5,60	4,47	41,20	49,92
MgO	10,38	1,06	<0,01	1,75	3,00	3,33	2,47	18,40

¹World Food and agriculture.Statistical pocketbook.Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2018.

² Ian Barnes. Operating experience of low grade fuels in circulating fluidized bed combustion (CFBC) boilers. June 2015. IEA Clean Coal Centre.

Продолжение таблицы 1

Na ₂ O	1,10	1,71	0,21	0,96	0,58	0,79	0,94	0,13
K ₂ O	28,10	25,60	3,71	12,30	11,60	4,15	15,00	9,64
SO ₃	1,93	4,40	0,72	1,24	0,44	2,08	1,83	2,04
P ₂ O ₃	7,64	1,26	0,43	1,41	4,50	2,72	7,40	1,34
CO ₂	14,80						18,24	8,18
Не определены	11,55	1,82	0,64	2,68	2,32	1,39	8,38	1,91
Высшая теплота сгорания								
МДж/кг	18,67	17,94	15,84	15,09	18,06	18,99	19,59	19,02

Биомасса, полученная из сельскохозяйственных культур (агробiomасса) является гораздо более сложным топливом, чем древесная биомасса. Агробiomасса включает в себя такие виды топлива, как мискантус, энергетическая трава и солома, которые широко доступны. Обработка отходов пищевой промышленности также становится значимой; в эту категорию входят кукурузная солома, рапсовый жмых, жмых из сахарного тростника (багасса), оливкового отжима и др. Все эти виды топлива являются однолетними культурами, потребляющими много удобрений из почвы, и они богаты хлором, азотом, фосфором и калием. При сжигании агробiomассы возникают следующие проблемы – спекание зольного слоя, что зашлаковывает поверхности нагрева котла и вызывает высокотемпературную коррозию на перегревателях. Это вызвано низкой температурой плавления золы и образованием полутвердых липких отложений. Содержание хлора и щелочи в агробiomассе намного выше, чем в древесной биомассе, и это является основным негативным фактором. Поэтому температура и давление пара в котлах при ее сжигании могут соответствовать сжиганию древесной биомассы, когда содержание хлора составляет менее 0,3% и содержание свинца в золе топлива также низкое. При более высоком содержании хлора температура пара должна быть ниже. Спекание и шлакообразование могут быть сведены к минимуму путем введения каолина в топку без необходимости снижения температуры сгорания.

На основе анализа данных, представленных в табл. 1, для исследования были выбраны отходы переработки сахарного тростника – багасса, поскольку по сравнению с другими видами агробiomассы она обладает наименьшей зольностью, низким содержанием хлора и серы и наиболее высоким выходом летучих веществ. Приведем краткую характеристику данного вида топлива.

Сахарный тростник является одним из наиболее перспективных сельскохозяйственных источников энергии биомассы в мире. Сахарный тростник производит в основном два вида биомассы – тростниковый мусор и багассу. Тростниковый мусор – это остатки на поле после сбора тростника, в то время как багасса – это волокнистый остаток, оставшийся после измельчения тростника с влажностью 45-50% и состоящий из смеси твердого волокна с мягкой и гладкой сердцевинкой, обладающей высокими гигроскопическими свойствами. Багасса содержит главным образом целлюлозу, гемицеллюлозу, пентозаны, лигнин, сахара, воск и минералы. Образующееся после переработки сахарного тростника количество багассы изменяется от 22 до 36% и в основном связано с волокнистой частью и чистотой поставляемого тростника, что, в свою очередь, зависит от практики сбора урожая.

Состав багассы зависит от разнообразия и зрелости сахарного тростника, а также от применяемых методов сбора урожая и эффективности переработки сахара. Багасса обычно сжигается в котлах для производства пара, направляемого на выработку электроэнергии. Багасса также становится привлекательным сырьем для производства биоэтанола, используется в качестве сырья для производства бумаги и в качестве корма для крупного рогатого скота. Значение багассы в качестве топлива во многом зависит от ее теплотворной способности, которая определяется ее составом, особенно в отношении содержания воды и теплотворной способности урожая сахарного тростника, которое в основном зависит от содержания сахарозы.

Содержание влаги является основным определяющим фактором теплотворной способности, чем ниже содержание влаги, тем выше теплота сгорания. Качественный процесс измельчения приводит к низкой влажности 45%, тогда как влажность 52% будет указывать на недостаточную эффективность измельчения. Большинство мельниц производят багассу с влажностью 48%, и большинство котлов предназначены для сжигания багассы с влажностью около 50%. Багасса также содержит приблизительно равную долю

волокна (целлюлозы), компонентами которого являются углерод, водород и кислород, некоторая сахароза (1-2%) и зола.

Известно, что багасса используется в качестве топлива для производства тепловой и электрической энергии в некоторых странах – производителях сахарного тростника, таких как Маврикий, остров Реюньон, Индия и Бразилия. Применение местных возобновляемых энергетических ресурсов способствует устойчивому развитию, повышению прибыльности и конкурентоспособности в отрасли и экономически эффективно способствует достижению экологического эффекта³.

В качестве еще одного низкосортного топлива выбран торф, который в отличие от агробиомассы является ископаемым ресурсом, хотя и в значительной мере возобновляемым.

Торф – это поверхностный органический слой почвы, состоящий из частично разложившегося органического материала, полученного в основном из растений, накопившихся в условиях заболачивания, недостатка кислорода, кислотности и дефицита питательных веществ. В умеренных, бореальных и субарктических регионах, где низкие температуры (ниже заморозания на длительные периоды в течение зимы) при уменьшении скорости разложения, торф образуется из мхов, трав, кустарников и небольших деревьев. Во влажных тропиках он образуется из деревьев тропического леса (листья, ветви, стволы и корни) при почти постоянно высокой температуре [2]. Торф можно рассматривать как низкосортное промежуточное топливо между биомассой и геологически более зрелым бурым углем.

Запасы торфяников чаще всего указываются по площади, поскольку первоначальная оценка запасов обычно возникает в результате обследования почвы или дистанционного зондирования. Даже там, где известны толщина отложений торфа и общие объемы торфа, количественно определить запасы с точки зрения энергии сложно, поскольку содержание энергии в торфе на месте зависит от его влажности и зольности. Органическая составляющая торфяных отложений имеет, однако, довольно постоянную безводную беззольную теплотворную способность 20–22 МДж/кг и, если общее количество органического материала известно вместе со средней влажностью и зольностью, тогда запас торфа может быть выражен в стандартных единицах энергии.

По данным Международного общества торфа мировые запасы данного вида топлива составляют около 4 млн. км², что эквивалентно 3% земной поверхности мира. Большинство торфяников в мире находятся в Северной Америке и северных частях Азии с большими территориями на севере и Центральной Европе и Юго-Восточной Азии, в то время как некоторые находятся в тропической Африке, Латинской Америке и Карибском бассейне. 85% мировой площади торфяников находится только в четырех странах: России, Канаде, США и Индонезии.

Типичные свойства топливного торфа по сравнению с каменным и бурым углем и древесиной приведены в табл.2.

Таблица 2

Состав и основные свойства различных видов твердого топлива⁴

Химический состав, %	Каменный уголь	Бурый уголь	Торф	Древесина
Углерод	76-87	65-75	50-60	48-55
Водород	3,5-5,0	4,5-5,5	5-7	6-7
Кислород	3-11	20-30	30-40	38-43
Азот	0,8-1,2	1-2	0,5-2,5	<0,6
Сера	1-3	1-3	0,1-0,4	0,02-0,06
Топливные свойства				
Летучие вещества, %	10-50	50-60	60-70	75-85
Зола, %	4-10	6-10	2-15	0,1-2,0
Температура плавления, °С	1100-1300	1100-1300	1100-1300	1350-1450
Насыпная плотность, кг/м ³	728-880	650-780	300-400	320-420
Теплота сгорания сухого топлива, МДж/кг	28-33	20-24	20-23	17-20

³<https://www.bioenergyconsult.com/?s=Energy+Potential+of+Bagasse>

⁴ Ian Barnes. Operating experience of low grade fuels in circulating fluidized bed combustion (CFBC) boilers. June 2015. IEA Clean Coal Centre.

Торф – горючее вещество бурого или черного цвета. Его горючая масса содержит очень большое количество кислорода, достигающее 33%. В торфе обычно мало серы, сравнительно немного золы (5-10%), но очень много влаги. Влажность торфяной массы в залежах доходит до 80-85%, поэтому процесс добычи торфа состоит из двух этапов: извлечение из залежи и сушка на воздухе до влажности порядка 40-50%. Теплота сгорания товарного торфа нормального качества с влажностью 40-50% находится в пределах 8,38-10,47 МДж/кг. Выход летучих веществ у торфа достигает порядка 70%. Зола торфа обычно легкоплавкая и имеет температуру плавления около 1000 °С .

По способу добычи торф разделяют на торф ручной резки, машиноформовочный, гидроторф и фрезерный. Первые два способа применяют для добычи небольших количеств кускового торфа, третий – для получения больших количеств кускового торфа машинами и четвертый – для получения мелких частиц размером 0,5-25 мм.

В современной энергетике широкое применение находит только фрезерный торф, как наиболее дешевый. При фрезерном способе добычи торфа торфяную массу взрыхляют на небольшую глубину (5-35 мм). Получающаяся торфяная крошка подсушивается, после чего ее убирают в штабеля.

Однако малая транспортабельность фрезерного торфа и ограниченная мощность отдельных месторождений затрудняют строительство современных мощных электростанций, работающих на торфе [3].

В работе рассмотрен торф следующего химического состава: $Q_H^P = 16044$ кДж/кг, влажность $W^P = 12,5\%$, зольность $A^P = 10\%$, содержание углерода $C^P = 43,25\%$, серы $S^P = 0$, азота $N^P = 1,94\%$, водорода $H^P = 4,34\%$, кислорода $O^P = 27,98\%$ (в предыдущих работах авторов рассматривался в качестве сырья для получения генераторного газа) [4].

Слоевое сжигание как способ эффективной переработки низкосортных топлив

Рассмотрим основные способы слоевого сжигания низкосортных топлив. Топочные устройства, в работе которых используется принцип слоевого сжигания, - это обычно топки, оборудованные решетками, и топки с нижней подачей. Первичный воздух проходит через неподвижный слой топлива, которое сушится, а в результате горения из него выделяются летучие вещества и сжигается коксовый остаток. Образующиеся горючие газы дожигаются над решеткой после ввода вторичного воздуха, зачастую в зоне сжигания, конструктивно отделенной от слоя топлива (в камере дожигания).

Известно несколько типов решеток, использующихся в конструкциях слоевых топок. Это неподвижные решетки, решетки с качающимися (опрокидывающимися) колосниками, переталкивающие решетки (наклонные и горизонтальные), решетки в виде бесконечного полотна (ленточные, чешуйчатые цепные), вращающиеся и вибрационные решетки. У каждого способа сжигания есть свои плюсы и минусы, которые проявляются при сжигании разных видов топлива, поэтому выбор следует делать после серьезного анализа, с учетом характеристик топлива и условий эксплуатации установки.

В целом топки, оборудованные решетками, подходят для сжигания топлива высокой влажности, разного фракционного состава (с ограничением по объему мелких пылевых частиц) и высокой зольности. Допускается сжигание смеси нескольких видов топлива, однако смешение топлива древесного происхождения с соломой, лузгой, шелухой и прочим может вызывать серьезные проблемы ввиду разного поведения этих видов топлива в процессе сжигания, что обусловлено низкой влажностью и низкой температурой плавления золы соломы и других сельскохозяйственных отходов. В этом случае необходимо обеспечить равномерное распределение состава смеси по сечению решетки [5].

Рассмотрим котел КЕ-10-14-С как наиболее соответствующий условиям сжигания низкосортных топлив. Общий вид данного котла схематично представлен на рис.1.

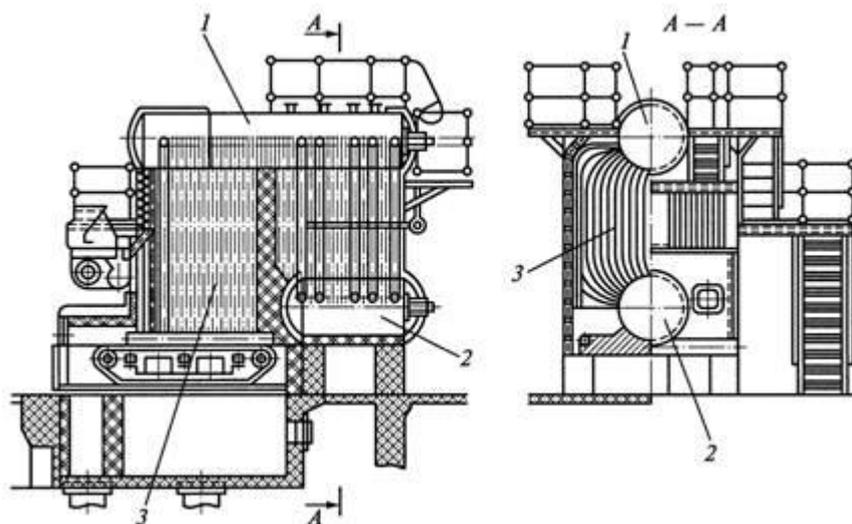


Рис. 1. Общий вид парового котла типа КЕ:

1 – верхний барабан; 2 – нижний барабан; 3 – конвективный пучок труб

КЕ-10-14 С – паровой твердотопливный котел с естественной циркуляцией со слоевой механической топкой, предназначенный для выработки насыщенного пара температурой 194 °С на технологические нужды промышленных предприятий, а так же в системах отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. Состоит из двух барабанов - верхнего и нижнего, экранированной топочной камеры и конвективного пучка. Котел снабжен механической топкой ТЛЗМ. Топка работает по принципу непрерывного заброса топлива на горящий слой, что в сочетании с обратным движением цепной ленточной решетки обеспечивает нижнее зажигание по всей площади колосникового полотна и стабильное горение. Особенностью топок является совмещение механического, как основного, и пневматического заброса топлива, позволяющего оптимизировать горение пылевых фракций в топочном объеме. Конструкция топки позволяет автоматизировать процесс горения⁵.

Размер кусков угля не должен превышать 40 мм, количество мелочи (0...6 мм) – не более 60%. При медленном движении решетки обеспечивается нижнее зажигание по всей площади колосникового полотна. Особенностью этих топок является совмещение двух способов заброса топлива на решетку: механического, как основного, и пневматического, необходимого для развеивания пылевых фракций и организации их горения в топочном объеме. Горение на решетке ТЛЗМ происходит в тонком слое, который устанавливается для заданной нагрузки при непрерывном забросе топлива и соответствующей подаче воздуха⁶.

Котлоагрегат КЕ-10-14С работает с факельно-слоевыми топочными устройствами типа ТЛЗМ-2 Кузинского машиностроительного завода, на которых регламентировано сжигать сортированные угли (в основном бурые) с большим выходом летучих. Фактически сжигают низкосортные угли (в основном каменные) в факельно-слоевых топочных устройствах, установленных на паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности. Эти топки не обеспечивают в полной мере эффективный процесс горения, при этом резко падает не только КПД (до 40-55%), но и производительность котлов в целом. Кроме того, возникают сопутствующие проблемы, вызванные увеличением выбросов загрязняющих веществ в воздушный бассейн [6-10].

Топочная камера оборудуется одной газомазутной горелкой ГМ, которая устанавливается на задней стенке камеры. При уменьшении влажности до 40-45% и зольности до 1% доля подсветки газом (мазутом) может быть уменьшена вплоть до полного устранения горелки.

В зависимости от влажности топлива выбираются хвостовые поверхности нагрева: при влажности 50-60% ставится воздухоподогреватель (трубчатый, ВП-О-444), при влажности 10-15% – экономайзер⁷.

⁵ сайт производителя: <http://www.bikz.ru>

⁶ сайт производителя: <https://saem.su/topka-tlzm-2-2-7-3-0>

⁷ сайт производителя: <http://www.bikz.ru>

Расчет котла при работе на проектном топливе, торфе и багассе проводился по методике, представленной в работах [3, 11].

Рассмотрим основные расчетные зависимости для определения эффективности сжигания низкосортных топлив, таких как багасса и торф, в котле КЕ-10-14С.

Тепловой баланс котла имеет вид:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \text{ или}$$

$$Q_n^p + Q_{в.внш} + Q_{тл} + Q_{хв} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + H_{yx} \quad (1)$$

где Q_p^p – располагаемая теплота топлива, кДж/кг; Q_n^p – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг; $Q_{в.внш}$ – теплота предварительного (внешнего) подогрева воздуха в калориферах перед его поступлением в воздухоподогреватель котла, кДж/кг; $Q_{тл}$ – физическая теплота топлива, кДж/кг; $Q_{хв}$ – теплота холодного воздуха, соответствующая объему уходящих газов, кДж/кг; Q_1 – удельная теплота, полезно воспринятая рабочей средой в котле, кДж/кг; $Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$ – сумма потерь теплоты соответственно с химическим и механическим недожогом, на наружное охлаждение и с теплотой шлака (золы), кДж/кг; H_{yx} – энтальпия уходящих газов, кДж/кг.

КПД котла по прямому балансу определяется по формуле, %:

$$\eta_k = q_1 = \frac{Q_1}{Q_p^p} \cdot 100$$

Полезно использованная теплота в котле рассчитывается:

$$Q_k = Q_1 = D(h_{не} - h_{нв}) + D_{пр}(h_{кш} - h_{пв}) \text{ кДж/кг}$$

Расход топлива на котел определяется по формуле:

$$B = \frac{100 \cdot Q_k}{Q_p^p \cdot \eta_k} \text{ ,кг/с} \quad (2)$$

Расчет основных параметров сжигания низкосортных топлив определяется на основе следующих зависимостей исходя из известных геометрических параметров топки.

По номинальной площади колосниковой решетки находим расчетную тепловую нагрузку зеркала горения $q_{R\text{расч}}$, кВт/м²:

$$q_{R\text{расч}} = \frac{B_p Q_n^p}{R},$$

где R – площадь поверхности зеркала горения, м².

При сжигании в котле непроектных топлив проводится поверочный расчет топки и определяется температура газов на выходе их топки, °С:

$$t''_T = \frac{T_a}{1 + MB_u^{-0,3} \left[\frac{5,6 \cdot 10^{-11} \psi_{ср} F_{ст} T_a^3}{\phi B_p (Vc)_{ср}} \right]^{0,6}} - 273, \quad (4)$$

где T_a – адиабатная температура горения топлива, К; M – параметр, учитывающий влияние на теплообмен уровня расположения горелок и степени забалластировки факела продуктами сгорания; B_u – эффективное значение критерия Бугера; $\psi_{ср}$ – коэффициент тепловой эффективности экранов; $F_{ст}$ – поверхность стен топки, м²; ϕ – коэффициент сохранения теплоты; $(Vc)_{ср}$ – средняя энтальпия продуктов сгорания, кДж/м³.

Температура газов на выходе из топки зависит от состава сжигаемого топлива и определяет условия теплообмена в конвективных поверхностях теплообмена.

В формуле (4) используются геометрические характеристики топочной камеры котла КЕ-10-14С, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Наименование	Обозначение	Значение
Средняя высота камеры догорания, м	h_k	1,6
Площадь колосниковой решетки, м ²	R	6,39
Объем топочной камеры, м ³	V_T	22,6
Общая поверхность топки, воспринимающая тепловое излучение, м ²	F_T	63,0
Скорость движения полотна решетки, м/ч	$w_{п}$	0,8-16

Результаты и обсуждение

В результате расчета теплообмена в топочной камере была определена эффективность сжигания низкосортных топлив (торфа и багассы) в слоевом котле КЕ-10–14С. При известных геометрических параметрах топки и характеристиках топлив было определено тепловое напряжения топочного объема и сечения топки, температура на выходе из топки и температура уходящих газов, а также другие параметры, представленные в табл. 4. В качестве проектного топлива рассматривался Донецкий уголь марки Д.

Таблица 4

Наименование	Обозначение	Донецкий уголь Д	Торф	Багасса
Заданные величины				
Паропроизводительность, кг/с	$D_{пе}$	2,78	2,78	2,78
Давление пара на выходе из котла, МПа	$p_{пе}$	1,3	1,3	1,3
Температура насыщенного пара, °С	$t_{пе}$	194	194	194
Температура питательной воды, °С	$t_{пв}$	100	100	100
Тип топочного устройства		ТЛЗМ	ТЛЗМ	ТЛЗМ
Поверхность площади зеркала горения, м ²	R	6,39	6,39	6,39
Объем топочной камеры, м ³	V_T	22,6	22,6	22,6
Площадь поверхности нагрева коактивного пучка, м ²		207,3	207,3	207,3
Теплота сгорания топлива, МДж/кг	Q_n^p	18,5	16,04	7,5
Температура уходящих газов, °С	v_{yx}	145	120	130
Общая поверхность топки, воспринимающая тепловое излучение, м ²	F_T	63,0	63,0	63,0
Рассчитанные величины				
Адиабатическая температура горения топлива, К	T_a	1850	1787	1549
Температура газов на выходе из топки, °С	v''_T	819	804	835
Объем продуктов сгорания, м ³ /кг топлива	$V_{сг}$	7,3	6,3	3,5
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки, кДж/кг топлива	$H_{сг}$	9675	7465	4865
Тепловое напряжение объема топочной камеры, кВт/м ³	q_v	334	326	325
Тепловое напряжения зеркала горения, кВт/м ²	q_R	1080	1132	1156
Д котла брутто, %	η_k	90,7	89,2	87,2
Расход топлива, кг/с	B_p	0,37	0,46	0,98

Результаты расчета котла КЕ-10-14С, предназначенного для слоевого сжигания твердого топлива, при его работе на проектном топливе (Донецком угле марки Д) и непроектном низкосортном топливе – торфе и багассе, показывают, что КПД котла несколько снижается – на 1,5% при работе на торфе и на 3,5% при сжигании багассы. Допустимое тепловое напряжение объема топочной камеры для всех исследованных топлив не превышает допустимого значения для данного котла (334 кВт/м³). Расход топлива при

сжигании багассы возрастает в 2,6 раза, что может привести к нарушению режима горения, который определяется высотой слоя на решетке. Однако достаточно широкий диапазон изменения скорости перемещения полотна колосниковой решетки позволяет отрегулировать процесс горения.

Выводы

На основе анализа состава и основных технических характеристик наиболее доступных низкосортных топлив были выбраны торф (в качестве ископаемого топлива) и отходы переработки сахарного тростника – багасса в качестве возобновляемого ресурса. По сравнению с другими видами агробиомассы она обладает наименьшей зольностью, низким содержанием хлора и серы и наиболее высоким выходом летучих веществ.

Результаты проведенных расчетных исследований показали, что КПД котла несколько снижается – на 1,5% при работе на торфе и на 3,5% при сжигании багассы. Однако, учитывая, что утилизация отходов переработки сахарного тростника обладает значимым экологическим эффектом, а торф для многих стран и регионов является местным топливом, такое снижение может быть вполне оправданным и легко компенсироваться низкой стоимостью топлива.

Полученные результаты показывают, что котлы типа КЕ могут эффективно использоваться в странах, обладающих значительными ресурсами низкосортных топлив для производства тепловой и электрической энергии в составе автономных источников энергоснабжения.

Литература

1. Singer JG. *Combustion Fossil Power*, 4thed. Combustion Engineering, Inc., Windsor, Connecticut, 1991.
2. Hans Joosten, Donal Clarke. *Wise use of mires and peatlands. Background and Principles including a Framework for Decision-making*. International Mire Conservation Group and International Peat Society. 2002. P.304
3. Жихар Г.И. Котельные установки тепловых электростанций. Минск: Вышэйшая школа, 2015. 529 с.
4. Тимофеева С.С. Мингалеева Г.Р. Перспективы использования торфа в региональной энергетике // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325. № 4 С. 46-55.
5. Карапетов, А. Обзор технологий слоевого сжигания // ЛесПромИнформ. 2016. № 1. С. 130-139.
6. Sustainable Hydrogen Production Processes. Energy, Economic and Ecological Issues. Silveira, José Luz (Ed.). *Green Energy and Technology*. Springer International Publishing. 2017. P. 185.
7. Вавилов В.И. Исследование эффективности сжигания низкосортного твердого топлива в паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности с двухъярусной топкой. 2009, Москва.
8. Bhardwaj A.K., Zenone, T., & Chen, J. *Sustainable biofuels: an ecological assessment of the future energy*. Berlin ; Boston : Walter de Gruyter GmbH/Higher Education Press. 2015. P. 345.
9. Глущенко О.Н., Струев А.М. Экологические аспекты переработки твердых топлив // Записки горного института. 2014. Т. 209. С. 116-118.
10. Вавилов В.И. Эффективное сжигание низкосортных углей в двухъярусной топке // Безопасность жизнедеятельность. 2009. № 6. С. 23-27.
11. Маргулова Т.Х. Компонировка и тепловой расчет котлоагрегата. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. 120с.

Авторы публикации

Савина Мария Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение, Казанский государственный энергетический университет.

Ндлову Эфраим Тинаше – магистрант, Казанский государственный энергетический университет.

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Энергетическое машиностроение» Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Singer JG. *Combustion Fossil Power*, 4th ed. Combustion Engineering, Inc., Windsor, Connecticut, 1991.

2. Hans Joosten, Donal Clarke. *Wise use of mires and peatlands. Background and Principles including a Framework for Decision-making*. International Mire Conservation Group and International Peat Society. 2002. P.304.

3. Zhixar G.I. *Kotelnye ustanovki teplovyx elektrostancij*. Minsk: Vyshejsheyashkola, 2015. 529p.

4. Timofeeva S.S. Mingaleeva G.R. Perspektivy` ispolzovaniya torfa v regionalnoj energetike. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Texnika I tehnologii v energetike*. 2014;325(4):46-55.

5. Karapetov A. *Obzor tehnologij sloevogo szhiganiya biotopliva*. LesPromInform. 2016;1:130-139.

6. Sustainable Hydrogen Production Processes. *Energy, Economic and Ecological Issues*. Silveira, José Luz (Ed.). Green Energy and Technology. Springer International Publishing. 2017.P. 185.

7. Vavilov VI. *Issledovanie effektivnosti szhiganiya nizkosortnogo tverdogo topliva v parovyx i vodogrejnnyx kotlax malojisrednej moshhnosti s dvuxyarusnoj topkoj*. 2009, Moskva.

8. Bhardwaj, AK, Zenone, T, & Chen J. Sustainable biofuels: an ecological assessment of the future energy. Berlin ;Boston : Walter de Gruyter GmbH. *Higher Education Press*. 2015. P. 345.

9. Glushhenko ON, Struev AM. Ekologicheskie aspekty`pererabotki tverdyyx topliv. *Zapiski gornogo instituta*. 2014;209:116-118.

10. Vavilov VI. Effektivnoe szhiganie nizkosortnyx uglej v dvuxyarusnoj topke. *Zhurnal Bezopasnost` zhiznedeyatel`nost*. M: izd-vo: Novye texnologii.2009;6:23-27.

11. Margulova TX. *Komponovka i teplovoj raschet kotloagregata*. M.L.: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1956. 120p.

Authors of the publication

Mariya V. Savina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email:pmv_83@mail.ru.

Efraim T. Ndlovu – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email:ndlovutinasha120@gmail.com.

Guzel R. Mingaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: mingaleeva-gr@mail.ru.

Поступила в редакцию

19 марта 2019 г.