



ПЕРЕВОД КОТЕЛЬНЫХ НА АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО

Макеева Е.Н.¹, Зверева Э.Р.², Морозова О.Ю.¹

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель,
Республика Беларусь

²Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Российская Федерация

belvira6@list.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Обосновать необходимость перевода котельных с мазута на печное бытовое топливо. *МЕТОДЫ.* Были проведены сравнительные исследования основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера). Рассчитаны экологические параметры загрязняющих веществ, образующихся при сжигании мазута и печного бытового топлива и проведено их сравнение со значениями, регламентируемыми ЭкоНцП 17.01.06-001-2017. Экологические нормы и правила. Охрана окружающей среды и природопользование, и ТКП 17.02-17-2019 (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование». *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В результате проведенных сравнительных исследований основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу. В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие основным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам за счет уменьшения в 70 раз количества выброшенного в атмосферный воздух диоксида серы за 10 суток сжигания печного бытового топлива, а также снижения концентрации данного вида выброса в 72,5 раза. При переходе с мазута на печное бытовое топливо, обеспечивается также уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы при десятидневном использовании нового резервного вида топлива. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Таким образом, в результате экспериментальных и расчетных исследований было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останова котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива.

Ключевые слова: мазут; печное бытовое топливо; вязкость; теплота сгорания; выбросы; оксиды серы; примеси; котельная.

Для цитирования: Макеева Е.Н., Зверева Э.Р., Морозова О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

CONVERSION OF BOILER HOUSES TO ALTERNATIVE FUEL

Makeeva E.N.¹, Zvereva E.R.², Morozova O.Yu.¹

¹Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation,

belvira6@list.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To justify the need to transfer boiler houses from fuel oil to furnace domestic fuel. *METHODS.* Comparative studies of the main indicators of the quality of fuel oil and

domestic heating oil (DHO) (heat of combustion, kinematic viscosity, flash point, pour point, ash content, humidity, sulfur content) were carried out. The environmental parameters of pollutants formed during the combustion of fuel oil and domestic stove fuel are calculated and compared with the values regulated by the EkoNiP 17.01.06-001-2017 "Environmental protection and nature management. Requirements of environmental safety" and TCU 17.02-XX-2019 "Environmental protection and nature management". **RESULTS.** As a result of comparative studies of the main indicators of the quality of fuel oil and furnace household fuel (PBT), it was shown that combustion in PBT boilers in comparison with fuel oil is preferable in terms of environmental consequences in terms of emissions into the atmosphere. As a result of the comparative analysis, it was found that during the transition from fuel oil to furnace household fuel, compliance with the basic environmental standards regulated by these regulatory documents is ensured by reducing by 70 times the amount of sulfur dioxide released into the atmospheric air during 10 days of burning furnace household fuel, as well as reducing the concentration of this type of emission by 72.5 times. When switching from fuel oil to furnace household fuel, pollution and equipment wear are also reduced due to the ash content index for furnace household fuel being 7 times lower than that of fuel oil, as well as a 2-fold reduction in the formation of soot and 70-fold reduction in sulfur dioxide during ten-day use of a new reserve type of fuel. **CONCLUSION.** Thus, as a result of experimental and calculated studies, it was shown that combustion in DHO boilers in comparison with fuel oil is preferable in terms of environmental consequences in terms of emissions into the atmosphere, reducing corrosion, stopping boilers for repairs, reducing fuel heating costs to facilitate transportation, reducing steam and fuel costs. When switching from fuel oil to furnace household fuel, pollution and equipment wear are also reduced due to the ash content index for furnace household fuel that is 7 times lower than that of fuel oil, as well as a 2-fold reduction in the formation of soot and 70-fold reduction in sulfur dioxide during ten-day use of a new reserve type of fuel.

Keywords: fuel oil; domestic furnace fuel; viscosity; heat of combustion; emissions; sulfur oxides; impurities; boiler room.

For citation: Makeeva E.N., Zvereva E.R., Morozova O.Yu. Conversion of boiler houses to alternative fuel. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

В качестве основного вида топлива для ТЭЦ и промышленных котельных Российской Федерации и Республики Беларусь используется природный газ. Резервным или аварийным источником топливоснабжения котельных и ТЭЦ являлся в основном мазут [1].

Среди весомых достоинств мазута, а именно, высокой теплоты сгорания (38-42 МДж/кг), малого содержания золы (до 0,5 %), возможности получения светящегося пламени, обеспечивающего высокий радиационный теплообмен в топочном пространстве, имеется и ряд серьезных недостатков.

К недостаткам мазута, как топлива относятся: высокая стоимость (27-30 тыс. руб. за тонну); высокая вязкость мазута, что приводит к закоксовыванию форсунок, к неполноте сгорания, к увеличению времени испарения и горения капли мазута; высокая токсичность; высокая огнеопасность, приводящая к повышенным требованиям к технике безопасности; высокое содержание серы (до 3,5 %) приводит к образованию сернистых газов, вызывающих низкотемпературную коррозию оборудования и вредные выбросы в атмосферу; высокая температура застывания (25-27 °С), что приводит к высоким затратам электроэнергии на перекачку и транспортировку топлива [2-4].

Система топливоподготовки мазута на ТЭЦ достаточно сложная, многоступенчатая включающая: разогрев, слив, организация хранения без расслоения на мазут и воду, разогрев и перемешивание в баках, транспортировка по трубопроводам, дополнительный подогрев перед форсунками, распыл, сжигание, предотвращение коррозионных процессов в котлах и экологических последствий по составу выбросов в атмосферу и по сливу замазученных вод, обеспечение требований техники безопасности [3-4].

В процессе эксплуатации установлено, что в настоящее время из-за глубокой переработки мазута на российских и белорусских нефтеперерабатывающих заводах условная вязкость мазута марки М-100 при 100 °С составляет более 6,8 ВУ [1]. Для его устойчивого горения требуется повысить температуру разогрева со 125 °С, как было ранее и на которую были спроектированы подогреватели мазута и горелки котлов, до 135 °С и более. Помимо этого, для применения мазута высокой вязкости требуется выполнить реконструкцию

мазутного хозяйства и горелок котлов, а также увеличить расход пара, а, следовательно, и топлива на его разогрев.

В процессе эксплуатации на теплотехническом оборудовании мазута глубокой переработки, который поставляется в данный момент времени на котельные установки, было выявлено, что использование подобного высоковязкого мазута, приводит к физическому загрязнению и порче оборудования [5-6].

Котельные топлива применяют в стационарных паровых котлах, в промышленных печах. Тяжелые моторные топлива используют в судовых энергетических установках. К котельным топливам относят топочные мазуты марок 40 и 100, вырабатываемые по ГОСТ 10585-2013, к тяжелым моторным топливам относят флотские мазуты Ф-5 и Ф-12, вырабатываемые по ГОСТ 10585-99. В общем балансе перечисленных топлив основное место занимают мазуты нефтяного происхождения. В таблице 1 приведены основные характеристики мазута М100 (ГОСТ 10585-2013).

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики мазута М100

The main characteristics of fuel oil M 100

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Метод испытания	Значение по ГОСТ 10585-2013	
				минимальное	максимальное
1	Вязкость кинематическая при 100 °С	мм ² /с	СТБ ИСО 3104	-	50,00
2	Зольность	%	ГОСТ 1461	-	0,14
3	Массовая доля механических примесей	%	ГОСТ 6370	-	1,0
4	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477	-	1,0
5	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	-	ГОСТ 6307, п. 7.5 ГОСТ 10585	Отсутствие	
6	Массовая доля серы	%	ГОСТ 32139	-	2,50 3,00
7	Температура вспышки в открытом тигле	°С	ГОСТ 4333	110	-
8	Температура застывания	°С	ГОСТ 20287 (метод Б)	-	25
9	Теплота сгорания (низшая) в пересчете на сухое топливо	кДж/кг	ГОСТ 34210	39900	-
10	Плотность при 15 °С	кг/м ³	ГОСТ ISO 3675	Не нормируется. Определение обязательно	

*Источник: Межгосударственный стандарт. Топливо нефтяное. Мазут. ГОСТ 10585-2013 <https://megakorm.ru/Data2/1/4293773/4293773181.pdf>. (Source: Interstate standard. Oil fuel. Fuel oil. GOST 10585-2013 <https://megakorm.ru/Data2/1/4293773/4293773181.pdf>)

Таким образом, мазут в котельных и на тепловых электрических станциях Российской Федерации и Республики Беларусь использовался длительное время, который был нормативно (в СНиП, ОСТ, ГОСТ) прописан как основное, резервное, аварийное, растопочное топливо. В результате появилось и существовало в советское и постсоветское время большое число объектов, где мазут был единственным стратегическим топливом.

В настоящее время является актуальным то, что эксплуатация мазута на ТЭЦ и котельных становится многозатратной (высокая цена, низкое качество, сернистость, затраты электроэнергии на перекачку и т.д.), поэтому мазут в настоящее время по многим параметрам не отвечает современным требованиям по энергоэффективности и экологичности, предъявляемым к основному и резервному котельному топливу и требуется его замена на другие виды топлив [7-11].

Целью исследования является обоснование необходимости перевода котельных с мазута на печное бытовое топливо.

Научная значимость данного исследования заключается в оценке соблюдения экологических требований, обосновании экономической эффективности и оптимальности технико-технологической реализации перехода на резервное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива взамен мазута.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при переводе пиковых котельных на резервное либо аварийное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива взамен мазута в целях экономии топливно-энергетических ресурсов.

По решению Республиканской комиссии по контролю за осуществлением расчетов за природный газ, электрическую и тепловую энергию Совета Министров Республики Беларусь от 26.06.2011 года, в целях экономии топливно-энергетических ресурсов Министерству энергетики было поручено исключить сжигание топлива на поддержание мазутного хозяйства на пиковых котельных [12].

В соответствии со СНиП II-35-76 «Котельные установки» с изменениями, утвержденными постановлением Госстроя России от 11.09.97 N 18-52 (введено в действие с 01.01.98), виды и объемы потребления основного, резервного и аварийного топлива, а также необходимость резервного или аварийного топлива для котельных устанавливается с учетом категории котельной, и в соответствии с утвержденными схемами теплоснабжения, по согласованию с топливоснабжающими организациями.

В связи со всем вышеизложенным и согласно разработанной «Схеме теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года», было принято решение перевести на резервное либо аварийное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива (ПБТ) взамен мазута ряд котельных. Характеристики топлива регламентированы ГОСТом ТУ ВУ 400091131.004-2009 (ТУ 38. 101656–87), 10585-99 (ТУ 38.101656-87) и приведены в таблице 2 [12].

Таблица 2

Table 2

Основные характеристики печного бытового топлива

The main characteristics of domestic stove fuel

№ п/п	Наименование показателя	Значения по ТУ ВУ 400091131.004-2009
1	Фракционный состав: при 250 °С перегоняется, % об. при 300 °С перегоняется, % об. при 350 °С перегоняется, % об., не более	Не нормируется. Определение обязательно 84
2	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с, не более	15,0
3	Температура застывания, °С, не выше: в период с 1 октября по 31 марта в период с 1 апреля по 30 сентября	-15 -5
4	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	62
5	Массовая доля серы, %, не более: вид II вид III вид IV	0,05 0,1 0,5

*Источник: 14. Открытое акционерное общество «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://mnpz.by>. Дата доступа: 12.10.2023 (Source: [14]. Open Joint Stock Company "Mozyr Oil Refinery" // [Electronic resource]. Access mode <https://mnpz.by>. Access date: 12.10.2023).

Печное бытовое топливо вырабатывается из дизельных фракций прямой перегонки и вторичного происхождения – дистиллятов термического, каталитического крекинга и коксования. Если в качестве основы для производства был использован дизель, то на выходе получается темное печное топливо, которое обладает специфическими свойствами. Чаще всего такое топливо используется в стационарных отопительных системах [13]. ПБТ изготавливается на высокотехнологичном оборудовании, которое позволяет регулировать свойства и показатели топлива. После изготовления топливо необходимо хранить в

специальных герметичных резервуарах, чтобы оно не испарялось, и не утрачивало своих полезных свойств. Обычно, для этого используются небольшие баллоны (бочки).

По физико-химическим свойствам печное топливо очень похоже на дизельное, но все же некоторые характеристики у них отличаются. Главными преимуществами печного топлива по сравнению с основными видами является высокая теплотворная способность и небольшая стоимость [12].

К прочим достоинствам печного топлива стоит отнести отсутствие какого-либо специфического запаха во время горения и хранения, который характерен для многих других видов нефтепродуктов. Также стоит отметить и низкую температуру застывания, что значительно расширяет сферу применения данного типа топлива. Хорошая текучесть, высокая теплота сгорания и экономичность – те преимущества, которые обеспечивают печному топливу широкое распространение и возможность использования в разных областях.

Основными характеристиками ПБТ являются: коксуемость, кислотность, зольность, кинематическая вязкость, температура вспышки, плотность.

Кинематическая вязкость топлива не должна превышать 8 мм²/с, а температура вспышки должна быть не менее 45 °С, чтобы оно не воспламенялось в процессе перевозки. Максимальное значение параметра зольности – 0,2 %. Что же касается плотности, цетанового и йодного числа, которые являются важными параметрами для дизельного топлива, то в данном случае они не нормируются.

Печное топливо по ряду показателей можно классифицировать на разные виды. Так, сегодня выделяют следующие марки: тяжелое, среднее, легкое. Соответствие той или иной марке определяется по ряду показателей, среди которых температура горения, вязкость, температура застывания, а также теплоемкость и наличие примесей.

По фракционному составу печное бытовое топливо может быть несколько тяжелее дизельного топлива по ГОСТ 305–82 (до 360 °С перегоняется до 90 % вместо 96 %, вязкость печного бытового топлива до 8,0 мм²/с при 20 °С против 3,0-6,0 мм²/с дизельного). В нем не нормируются цетановое и йодное числа, температура помутнения. При переработке сернистых нефтей массовая доля серы в топливе – до 1,1 %. В период с 1 апреля по 1 сентября допускается производство топлива с температурой застывания не выше – 5 °С. Для улучшения низкотемпературных свойств печного топлива в промышленности применяют депрессорные присадки, синтезированные на основе сополимера этилена с винилацетатом [12].

Печное бытовое топливо предназначено для сжигания в отопительных установках небольшой мощности, расположенных непосредственно в жилых помещениях, а также в теплогенераторах средней мощности, используемых в сельском хозяйстве. Требования, предъявляемые к качеству котельных, тяжелых моторных и судовых топлив, устанавливающие условия их применения, определяются такими показателями качества топлива, как вязкость, содержание серы, теплота сгорания, температуры застывания и вспышки, содержание воды, механических примесей и зольность.

Научное обоснование перевода котла с мазута на печное бытовое топливо авторам представлялось в получении, обобщении и сравнении полученных экспериментальных данных по основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам мазута М100 и ПБТ, а также полученных расчетных данных по выбросам вредных веществ, образующихся при сжигании данных видов топлива в котлах.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объекта исследования выбраны мазут и печное бытовое топливо (ПБТ) производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод». Основные характеристики мазута и ПБТ производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» приведены в таблицах 1 и 2 [14].

Требования, предъявляемые к качеству котельных топлив, устанавливающие условия их применения, определяются такими показателями качества, как вязкость, содержание серы, теплота сгорания, температуры застывания и вспышки, содержание воды, механических примесей и зольность [15].

Были проведены эксперименты и определены теплоты сгорания, зольность, вязкость кинематическая, зольность, влажность, содержание серы, воды, температура застывания и температура вспышки.

1. Изучение теплоты сгорания

Исследования низшей рабочей теплоты сгорания мазута и печного бытового топлива проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 21261-91. Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания

Метод определения заключался в полном сжигании определенной массы испытуемого образца жидкого топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода и измерении

количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива.

2. Исследования вязкости

Определение вязкости проводилось согласно СТБ ИСО 3104, ГОСТ 33-2016 «Нефть и нефтепродукты. прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости» при температурах +20 °С (для ПБТ) и +100 °С (для мазута М100). Сущность метода заключается в измерении калиброванным стеклянным вискозиметром времени истечения в секундах определенного объема испытуемой жидкости под влиянием силы тяжести при известной и постоянно контролируемой температуре. Кинематическая вязкость является произведением измеренного времени истечения на постоянную вискозиметра

3. Определение массовой доли серы

Определение массовой доли серы в образцах мазута и печного бытового топлива проводилось методом сжигания образцов в адиабатическом бомбовом калориметре АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 3877-88. Метод определения заключался в сжигании определенной массы образцов мазута и печного бытового топлива в калориметрической бомбе в в адиабатическом режиме в среде сжатого кислорода под давлением и расчете теплового эффекта.

4. Исследование температуры вспышки в закрытом тигле.

Определение температуры вспышки в закрытом тигле в мазуте и печном бытовом топливе проводилось по ГОСТ 6356-75. Группа Б09. «Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле». Сущность метода заключается в определении самой низкой температуры горючего вещества, при которой в условиях испытания над его поверхностью образуется смесь паров и газов с воздухом, способная вспыхивать в воздухе от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для последующего горения. Для этого испытуемые продукты нагреваются в закрытом тигле аппарата «ТВЗ» для определения температур вспышки в закрытом тигле с постоянной скоростью при непрерывном перемешивании и испытывается на вспышку через определенные интервалы температур.

5. Определение зольности

Определение температуры текучести в мазуте и печном бытовом топливе проводилось согласно ГОСТ 1461-75 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности». Сущность метода заключается в сжигании массы испытуемого нефтепродукта и прокаливании твердого остатка до постоянной массы в муфельной печи Е72-24960 Печь муфельная L9/11/SKM/B180.

6. Определение температуры застывания

Исследование температуры застывания мазута и печного бытового топлива проводилось согласно ГОСТ 20287-91 «Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания». Сущность методов заключается в предварительном нагревании образца испытуемого нефтепродукта с последующим охлаждением его с заданной скоростью до температуры, при которой образец остается неподвижным. Указанную температуру принимают за температуру застывания.

7. Определение влажности

Определение влажности в мазуте и печном бытовом топливе проводилось по ГОСТ 2477-2014 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды». Сущность метода состоит в нагревании пробы нефтепродуктов с нерастворимым в воде растворителем и изменении объема сконденсированной воды.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты исследований представлены в качестве сравнения показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера) на диаграммах (рис. 1-3).



Рис. 1. Нижшая теплота сгорания (МДж/кг) и вязкость кинематическая (мм²/с) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 1. Lower calorific value (MJ/kg) and kinematic viscosity (mm²/s) for fuel oil and household heating fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).



Рис. 2. Температура вспышки и температура застывания (°C) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 2. Flash point and pour point (°C) for fuel oil and heating household fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).



Рис. 3. Зольность, массовая доля воды и массовая доля серы (%) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 3. Ash content, mass fraction of water and mass fraction of sulfur (%) for fuel oil and heating household fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Как видно из рисунка 1 печное бытовое топливо обладает большей (42,2 МДж/кг) по сравнению с мазутом 100 (39,9 МДж/кг) теплотой сгорания, следовательно, расход топлива на котельной при использовании мазута будет выше, чем при использовании печного бытового топлива.

Вязкость топлива определяет методы и продолжительность сливно-наливных операций, условия перевозки и перекачки, гидравлические сопротивления при транспортировании топлива по трубопроводам, эффективность работы форсунок. Как показано на сравнительных диаграммах, (рисунок 1) печное бытовое топливо здесь имеет явные преимущества по сравнению с мазутом. Для устойчивого горения мазута (с условной вязкостью 6,99069 °ВУ) потребуется повысить температуру разогрева с 125 °С, как было ранее и на которую были спроектированы подогреватели мазута и горелки котлов, до 135 °С. Кроме того потребуются дополнительный расход пара а, следовательно, и топлива на его разогрев [12].

Сравнение температур вспышки (рис. 2) показало, что мазут 100 имеет более высокую температуру вспышки (110 °С) по сравнению с ПБТ (62 °С), поэтому оно нуждается в добавлении присадок, обладающих каталитическим эффектом – активаторы горения.

Температура застывания у топлив производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» (рис. 2) следующая: у мазута М100 не выше +25 °С, у ПБТ – летом не выше -5 °С, а зимой не выше -15 °С. Следовательно, условия слива и перекачки топлива по трубопроводам значительно лучше у ПБТ, и для поддержания указанного топлива в высокотекучем состоянии будет значительно меньше произведено энергозатрат, по сравнению с мазутом.

Изучение зольности, массовой доли воды и массовая доли серы (%) для мазута и печного бытового топлива показало, что бытовое технологическое топливо при сжигании образует меньшее количество твердых частиц, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами. При сжигании мазута (с массовой долей серы 3 %) образуется значительно большее количество токсичных оксидов серы, которые также выбрасываются в атмосферу, вызывают интенсивную низкотемпературную коррозию поверхностей теплоэнергетического оборудования, требуют повышенные температуры для дымовых газов за котлом для снижения коррозии [15-17].

Повышенные значения воды в мазуте, по сравнению с ПБТ будут снижать эффективность использования топлива. В случае подачи в форсунки плохо перемешанного

обводненного мазута наблюдаются пульсации горения, которые приводят и к срыву пламени. Наблюдается также перерасход топлива за счет недожога [18-19].

Следовательно, как показали результаты исследований, сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останов котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива. Далее проведена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива.

Оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива

Выполнена в соответствии с ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт». Используемые для расчета характеристики мазута и печного бытового топлива приведены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Характеристики жидкого топлива согласно ТКП 17.08-04-2006
Characteristics of liquid fuel according to the TCP 17.08-04-2006

Наименование	Вид	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_n^r
		W_t^r	A^r	S^r	C^r	H^r	N^r	O^r	
Мазут малозольный	вид VI	1	0,04	2,7	82,4	13,16	-	0,7	39,64
Печное бытовое топливо	вид В	-	0,02	0,04	84,3	15,46	-	0,18	42,30

* Источник: ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт». (Source: TCP 17.08-04-2006 (02120) "Environmental protection and nature management. Atmosphere. Emissions of pollutants into the atmospheric air. The procedure for determining emissions from fuel combustion in boilers with a heating capacity of more than 25 MW".).

Расчеты проводись с учетом того, что оксиды серы в котле летучей золой не связываются, золоуловители и сероулавливающие установки не используются. Максимальный расчетный расход топлива принимаем равным 5,9 т/ч. Результаты расчетов, выполненные согласно ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт», представлены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5

Выбросы загрязняющих веществ
Emissions of pollutants

Наименование	Вид	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, г/с					Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_n^r
		M_{SO_2}	M_{NO_x}	M_{CO}	M_v	M_c	
Мазут малозольный	вид VI	88,57	2,175	3,75	0,46	0,4	39,64
Печное бытовое топливо	вид В	1,312	2,424	4,007	-	0,21	42,30

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

где M_{SO_2} – количество диоксида серы, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_{NO_x} – количество оксидов азота в пересчете на диоксид азота (NO_2), г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_{CO} – количество оксида углерода, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_c – количество сажи, г/с, образующееся в топке в результате недожога топлива и выбрасываемое в атмосферный воздух при сжигании мазута, дизельного, печного бытового и других легких жидких топлив;

M_v – количество мазутной золы в пересчете на ванадий, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании мазута.

Заключение (Conclusions)

В советское время мазут был нормативно (в СНиП, ОСТ, ГОСТ) прописан как основное, резервное, аварийное, растопочное топливо. Но в связи с увеличением степени глубины переработки нефти качество мазутного топлива продолжает неуклонно ухудшаться, что приводит к снижению энергетической, экономической и экологической эффективности его использования. Поэтому мазут практически по всем своим параметрам не отвечает современным требованиям, которым должно удовлетворять топливо [14, 16]. На сегодняшний день эксплуатация котельных и ТЭЦ, на которых мазут используется как основное и резервное топливо, является высокочрезвычайно затратной и не может быть надежной с точки зрения исключения чрезвычайных ситуаций. В качестве альтернативного резервного топлива на котельных и ТЭЦ предлагается использовать печное бытовое топливо.

В результате проведенных сравнительных исследований основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера) было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останова котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива.

Далее проведена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива. Рассчитаны экологические параметры загрязняющих веществ, образующихся при сжигании мазута и печного бытового топлива и проведено их сравнение со значениями, регламентируемыми ЭкоНиП 17.01.06-001-2017. Экологические нормы и правила. Охрана окружающей среды и природопользование, и ТКП 17.02-17-2019 (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование».

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие основным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам. При переходе с мазута на печное бытовое топливо, обеспечивается уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы.

Литература

1. Морозова О.Ю., Шаповалов А.В., Заглубоцкий Н.З. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. XX Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых. 2020. С. 142–146.
2. Zvereva E.R. et al. Modification of the rheological properties of heavy boiler fuel by adding carbon nanotubes and dehydrated carbonate sludge // Petroleum Chemistry. 2019. Vol. 59, No. 1. Pp. 106–110.
3. Власова Г.В., Сальникова Т.В., Пивоварова Н.А. Участие химических реагентов в изменении физико-химических свойств мазута // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 1. С. 29–36.
4. Namidreza F.F., Hojat G., Hasan K.M.Sh. Газификация тяжелого нефтяного топлива: энергетический и эксергетический анализ для различных газифицирующих агентов // Нефтехимия. 2021. Т. 61. № 2. С. 184–194.
5. Морозов А.Л. и др. Опыт эксплуатации блока по удалению сероводорода из мазута // Химия и технология топлив и масел. 2021. № 4 (626). С. 53–56.

6. Макеева Е.Н., Найден Е.С. Влияние концентрации этанола и изопропанола на октановое число бензина и цетановое число дизельного топлива // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2022. № 4 (91). С. 66–72.
7. Ведрученко В.Р. и др. Разработка схем и выбор энергосберегающих технологий при проектировании и эксплуатации отопительных котельных // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 5 (139). С. 19–22.
8. Hong T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings // Applied Energy. 2014. 126. Pp. 90–106.
9. Ахметшин М.Р., Няшина Г.С., Медведев В.В. Антропогенные газовые выбросы при сжигании суспензионных топлив и отходов нефтепереработки // Кокс и химия. 2021. № 4. С. 36–43.
10. Ветошкин А.Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов. Учебно-практическое пособие. 2-е изд. доп. и перераб. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 316 с.
11. Thring R.H. Platinum Improves Economy and Reduces Pollutants from A Range of Fuels // The Catalytic Engine. 1980. No. 24. Pp. 126–133.
12. Шаповалов А.В., Заглубоцкий Н.З., Морозова О.Ю. Реконструкция топливного хозяйства Гомельского теплофикационного комплекса // Современные проблемы машиноведения. XIII Международная научно-технической конференция студентов, магистрантов и молодых ученых. 2020. С. 210–212.
13. Рыков А.Н., Бушкевич О.А. Схема теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года: в 3 т. М.: Проектное научно-исследовательское республиканское предприятие «БелНИПИЭнергоПром», 2018. Т. 1, ч. 1. 230 с.
14. Открытое акционерное общество «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://mnpz.by>. Дата доступа: 12.10.2023.
15. Hu Z. A Mathematical Model for In-Cylinder Catalytic Oxidation of Hydrocarbons in Spark-ignition Engines // SAE Paper 961196. 1996.
16. Зверева Э.Р. и др. Изучение влияния карбонатной присадки на реологические свойства нефтяного котельного топлива // Промышленная энергетика. 2021. № 7. С. 22–26.
17. Орлов М.Е., Шараров В.И. Проблемы обеспечения котельных резервным топливом в современных условиях // Промышленная энергетика. 2007. № 9. С. 8–13.
18. Грибков А.М. Обеспечение технологического норматива по оксидам серы для котлов ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 164–175.
19. Халид Э.Ш., Рябов Г.А., Бухаркина Т.В. особенности образования и подавления выбросов оксидов серы при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂ // Электрические станции. 2019. № 8 (1057). С. 18–24.

Авторы публикации

Макеева Екатерина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Морозова Ольга Юрьевна. – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

References

1. Morozova O.Yu., Shapovalov A.V., Zaglubotsky N.Z. Backup fuel supply to boiler houses of RUE “Gomelenergo” operating in peak mode. *Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Energy and Management. XX International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists.* 2020: 142–146.
2. Zvereva E.R. et al. Modification of the rheological properties of heavy boiler fuel by adding carbon nanotubes and dehydrated carbonate sludge. *Petroleum Chemistry.* 2019; 59 (1): 106–110.
3. Vlasova G.V., Salnikova T.V., Pivovarova N.A. Participation of chemical reagents in changing the physical and chemical properties of fuel oil. *Oil and gas technologies and environmental safety.* 2023; 1: 29–36.

4. Hamidreza F.F., Hojat G., Hasan K.M.Sh. Gasification of heavy fuel oil: energy and exergy analysis for various gasifying agents. *Neftekhimiya*. 2021; 61 (2): 184–194.
5. Morozov A.L. et al. Experience in operating a unit for removing hydrogen sulfide from fuel oil. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2021; 4 (626): 53–56.
6. Makeeva E.N., Nayden E.S. The influence of the concentration of ethanol and isopropanol on the octane number of gasoline and the cetane number of diesel fuel. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after. BY. Sukhoi*. 2022; 4 (91): 66–72.
7. Vedruchenko V.R. et al. Development of schemes and selection of energy-saving technologies in the design and operation of heating boiler houses. *Energy saving and water treatment*. 2022; 5 (139): 19–22.
8. Hong T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings. *Applied Energy*. 2014; 126: 90–106.
9. Akhmetshin M.R., Nyashina G.S., Medvedev V.V. Anthropogenic gas emissions from the combustion of suspension fuels and oil refining waste. *Coke and Chemistry*. 2021; 4: 36-43.
10. Vetoshkin A.G. *Engineering protection of the atmosphere from harmful emissions. Educational and practical manual*. 2nd ed. Moscow: Infra-Engineering; 2016.
11. Thring R.H. Platinum Improves Economy and Reduces Pollutants from A Range of Fuels. *The Catalytic Engine*. 1980; 24: 126–133.
12. Shapovalov A.V., Zaglubotsky N.Z., Morozova O.Yu. Reconstruction of the fuel economy of the Gomel heating complex. *Modern Problems of Mechanical Engineering. XIII International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists*. 2020: 210–212.
13. Rykov A.N., Bushkevich O.A. *Heat supply scheme for the city of Gomel for 2025 with a perspective until 2030: in 3 volumes*. M.: Design Research Republican Enterprise “BelNIPIEnergProm”; 2018.
14. Open joint-stock company “Mozyr Oil Refinery”. [Electronic resource]. Access mode <https://mnpz.by>. Access date: 10.12.2023.
15. Hu Z.A *Mathematical Model for In-Cylinder Catalytic Oxidation of Hydrocarbons in Spark-ignition Engines*. SAE Paper 961196; 1996.
16. Zvereva E.R. et al. Study of the influence of carbonate additives on the rheological properties of oil boiler fuel. *Industrial Energy*. 2021; 7: 22–26.
17. Orlov M.E., Sharapov V.I. Problems of providing boiler houses with reserve fuel in modern conditions. *Industrial Energy*. 2007; 9: 8–13.
18. Gribkov A.M. Ensuring technological standards for sulfur oxides for thermal power plant boilers. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2020; 22 (6): 164–175.
19. Khalid E.Sh., Ryabov G.A., Bukharkina T.V. Features of the formation and suppression of sulfur oxide emissions during combustion of fuels in an oxygen environment with CO₂ recycling. *Electric Stations*. 2019; 8 (1057): 18–24.

Authorsofthepublication

Ekaterina N. Makeeva –Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi.

Elvira R. Zvereva– Kazan State Power Engineering University.

Olga Y. Morozova – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Получено **29.11.2023 г.**

Отредактировано **18.12.2023 г.**

Принято **09.01.2024 г.**