

2. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.Ie. *Proektirovanie sistem upravleniia* [Design of Control Systems]. Moscow, 2004, 911 p.

3. Pankratov V.V., Nos O.V. *Special'nye razdely teorii avtomaticheskogo upravleniia: Ch. 1. Modal'noe upravlenie i nabludatel'i* [Special sections of the automatic control theory: Part 1. Modal control and observers]. Novosibirsk, 2011, 248 p.

4. *Sovremennaiia prikladnaia teoriia upravleniia: Novye klassy regulatorov tekhnicheskikh sistem* [Modern Applied Control Theory: New classes of technical systems regulators]. Taganrog, 2000. Ch. III, 656 p.

5. Kozhevnikov A.V., Sorokin G.A. Metod rascheta poter' elektroenergii ot vynuzhennykh kolebaniy toka iakoria dvigate-lia pri rabote privodov listovykh prokatnykh stanov [The method of calculation of power losses from the forced oscillations of current motor armature with the drive of sheet mills] *Proiz-*

vodstvo prokata [Production of rolled products], 2014, №6, pp. 19–23.

6. Kozhevnikov A.V., Volkov V.N. Razrabotka funktsii samonastroiki sistemy upravleniia elektroprivodom na baze geneticheskogo algoritma [The method of calculation of power losses from the forced oscillations of current motor armature with the drive of sheet mills]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii* [Production of rolled products], 2015, №2, pp. 41–45.

7. Kochneva T.N., Kozhevnikov A.V., Kochnev N.V. Sintez modal'nogo regul'atora i ocenka effektivnosti modal'nogo upravleniia dlia dvumassovykh elektromekhanicheskikh sistem [Synthesis of modal control and evaluation of modal control for a two-mass electromechanical systems]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. Cherepovets, 2013, № 4 (52), T. 2, pp. 15–22.

УДК 662.6/9

В.К. Любов, А.Н. Попов, А.Е. Ивуть, С.О. Кондаков, Н.И. Седлецкий
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова
(Архангельск)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ФАНЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Древесина и побочные продукты ее обработки и переработки являются возобновляемым источником энергии с нейтральным уровнем эмиссии углерода и могут быть эффективно использованы в решении энергетических проблем. В данной работе представлены результаты комплексного энергетического обследования основного и вспомогательного оборудования парового котельного агрегата мощностью 22 МВт. В топке котлоагрегата, оборудованной наклонно-переталкивающей решеткой, реализована трехступенчатая схема сжигания, обеспечившая эффективное энергетическое использование отходов фанерного производства. Выполнен анализ конструктивных особенностей установленного котлоагрегата, определены составляющие теплового баланса, исследованы выбросы оксидов азота, углерода и твердых частиц.

Котельная установка, топливо, вредные вещества, топка, система автоматики, золоуловитель, потери тепла.

Wood and byproducts of wood processing are renewable energy sources which are carbon-neutral and may be effectively used in solving of energy problems. This paper presents the results of comprehensive energy examination of the main and auxiliary equipment of steam boiler of 22 MW capacity. In the furnace of the boiler equipped with reciprocating grate a three-stage combustion scheme was implemented to ensure effective energy use of wastes from plywood production. Boiler design features were analyzed, components of heat balance were calculated, emissions of nitrogen oxides, carbon oxides and particulate pollutant were examined.

Boiler plant, fuel, harmful substances, furnace, automation system, ash collector, heat losses.

Введение

Побочные продукты, образующиеся на всех этапах технологических процессов обработки и переработки древесины, могут быть промышленно использованы в различных направлениях без нарушения экологического равновесия. Поэтому в индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемых топлив биотопливом.

Основная часть

Для снижения себестоимости тепловой энергии, уменьшения влияния факторов внешней среды на устойчивость и стабильность развития предприятия и для комплексного снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду в ЗАО «Архангельский фанерный завод» в 2015 году был смонтирован и запущен в работу котлоагрегат PRD 22000 австрийской фирмы “Polytechnik Luft- und Feuerung-

stechnik GmbH”. Котлоагрегат установлен в индивидуальной производственной котельной, предназначенной для обеспечения паром технологического цикла фанерного производства, оборудован индивидуальной дымовой трубой высотой 34 м и автоматической системой управления всеми процессами. Котлоагрегат рассчитан на выработку насыщенного пара с рабочим давлением 1,2 МПа, его номинальная паропроизводительность составляет 34,0 т/ч.

Топливом для котлоагрегата является смесь, состоящая из дробленки фанеры, березовой коры, древесно-шлифовальной пыли (ДШП), опилок от обработки фанеры и шпона. Компоненты данной топливной смеси значительно различаются как по теплотехническим характеристикам (влажности, зольности, теплотворной способности), так и по технологическим показателям (сыпучести, взрывоопасности), но особенно сильно гранулометрическим составом [1]. Размеры частиц в данной топливной смеси раз-

личаются более, чем в тысячу раз, что делает ее «уникальной» и очень сложной для обеспечения эффективного и взрывобезопасного энергетического использования. ДШП и опилки с линий обрезки фанеры являются мелкофракционным материалом и относятся к IV группе взрывоопасности. Критерий взрываемости (K_T) для них имеет большие значения ($K_T^{\text{ДШП}} = 10,85$; $K_T^{\text{опил}} = 9,66$). Таким образом, состав сжигаемого древесного топлива максимально усложняет условия эксплуатации котлоагрегата PRD 22000.

Для комплексной оценки эффективности работы установленного оборудования было проведено энергетическое обследование котельной. При этом паропроизводительность котлоагрегата изменялась в диапазоне 89,0 – 96,0 % от номинальной.

Здание котельной (размером в плане 19,0×33,0 м) имеет один склад топлива (11,6×10,25 м) и оборудовано системой топливоподачи. Топливо с помощью шести толкателей подается на цепной скребковый транспортер, который расположен под углом 90° к топливному складу с «живым» дном. Транспортер оборудован штангой со скребками и приводится в действие гидравлическим цилиндром от маслостанции.

Транспортер обеспечивает подачу топлива в загрузочную шахту автоподатчика, уровень топлива в которой контролируется фотоэлектрическими датчиками. Для защиты от обратного возгорания шахта и цепной скребковый транспортер оснащены тепловой и электрической защитами. Из шахты топливо поступает на толкатель, который обеспечивает его транспортировку через загрузочное устройство на колосниковую решетку топочной камеры в зону подсушки и испарения влаги. Загрузка топочного устройства осуществляется в тактовом режиме в зависимости от расхода тепла потребителями, состава и влажности топлива.

Топка оборудована наклонно-переталкивающей колосниковой решеткой. В обмуровке боковых стен над колосниковой решеткой организованы пять «фотобарьеров» для контроля высоты слоя топлива. В исследованном диапазоне нагрузок теплотенергия зеркала горения составляло 0,746...0,802 МВт/м². Под колосниковой решеткой с помощью перегородок организованы четыре зоны с индивидуальным подводом в них, с одной стороны, первичного воздуха, а с другой – рециркулирующих продуктов сгорания. Подача горячего воздуха после воздухоподогревателя в каждую из зон колосниковой решетки осуществляется с помощью индивидуального вентилятора.

Воздух на вторичное дутье может забираться как из верхней, так и нижней части помещения котельной и с помощью вентилятора вводится в объем топочной камеры рассредоточено через сопла цилиндрической формы. Сопла расположены в шахматном порядке на боковых стенах (выше сопел рециркуляции). Вторичный воздух обеспечивает дожигание горючих компонентов топлива и позволяет минимизировать образование оксидов азота.

В топочной камере котлоагрегата реализована трехступенчатая схема сжигания. Для дополнитель-

ного снижения выбросов оксидов азота, повышения надежности работы колосниковой решетки и обмуровки топки установлены две системы рециркуляции продуктов сгорания и дополнительные дымососы. Забор продуктов сгорания в линии рециркуляции осуществляется из газохода после основного дымососа. Продукты сгорания с помощью дымососа рециркуляции № 1 направляются в объем топочной камеры над колосниковой решеткой со стороны боковых стен через цилиндрические встречно направленные сопла. Под колосниковую решетку котла газы рециркуляции подаются позонно с помощью дымососа рециркуляции № 2. Суммарная доля газов рециркуляции составляла ($r_{\text{рец}} = 0,35...0,40$). Все тягодутьевые установки имеют частотное регулирование производительности.

Котлоагрегат оборудован двухходовыми дымогарными парогенераторами, расположенными горизонтально вдоль продольной оси, над топочной камерой. На выходе из топки продукты сгорания разделяются на два потока и поступают в парогенераторы. При проведении энергообследования температура насыщенного пара на выходе из парогенераторов составляла 189...191 °С, т.е. имела значение, близкое к нормативному. Температура газов на входе в парогенераторы изменялись в диапазоне 850...868 °С, а после них 231...244 °С (см. таблицу).

Стены топочной камеры выполнены из огнеупорной шамотной обмуровки и для увеличения времени пребывания дымовых газов в топке установлен один промежуточный свод. Температурный уровень обмуровки топочной камеры контролируется с помощью термопар в восьми точках по ходу движения продуктов сгорания.

Продукты сгорания, совершив два хода в каналах топочной камеры, поступают в водоохлаждаемые поворотные камеры парогенераторов, в которых разворачиваются на 90° и совершают два хода, проходя внутри дымогарных труб. После этого продукты сгорания поступают в газораспределительную камеру водяного экономайзера, из которой по 400 трубам направляются вниз, отдавая тепло питательной воде. Подвод воды осуществляется в нижнюю часть корпуса экономайзера, а ее отвод из верхней части.

При проведении энергообследования средняя скорость газа при совершении I-го хода в парогенераторах составляла 16,4... 17,0 м/с; при совершении II-го хода она повышается до $W_g = 17,5...18,2$ м/с. Скорость газов в трубах водяного экономайзера, в исследованном диапазоне нагрузок, составляла $W_g = 15,8...16,4$ м/с.

После экономайзера дымовые газы поступают в мультициклон RGE 22000, где очищаются от твердых частиц. Очищенный газ направляется в рекуперативный трубчатый воздухоподогреватель LUVU 22000, в котором, совершая два хода, обеспечивает подогрев первичного воздуха. Поверхность нагрева воздухоподогревателя составляет 470 м².

Для очистки от золовых частиц поверхностей дымогарных труб парогенераторов, водяного экономайзера и воздухоподогревателя котлоагрегат оборудован системой пневмообдувки. При проведении энергетического обследования в топку котлоагрегата

подавались отходы фанерного производства, в состав которых входили кора, шпон, дробленка фанеры, ДШП и опилки. Сжигаемая топливная смесь имела высокую степень неоднородности гранулометрического состава (средний коэффициент полидисперсности $n = 0,655$, а коэффициент, характеризующий крупность состава, $b = 3,258 \cdot 10^{-3}$). Влажность древесного топлива (см. табл.) была ниже проектной (30,0–32,0 %), что связано с большим содержанием в смеси мелких взрывоопасных фракций (ДШП и опилки с линии обрезки фанеры). Массовая доля

частиц размером менее 2 мм составляла более 32 % (рис. 1).

Результаты балансовых опытов показали, что конструкция котлоагрегата и система автоматического регулирования режимов его работы обеспечивают высокую полноту выгорания оксида углерода, концентрация которого не превышала 35 мг/нм^3 при $K_{O_2} = 6 \%$ (см. таблицу). Температура воды на входе в экономайзеры котлоагрегатов была стабильной, что позволяло обеспечить ее дегазацию и достаточно глубокое охлаждение дымовых газов.

Таблица

Некоторые результаты испытаний котлоагрегата PRD-22000

Наименование величины	Обозначения, размеры	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3
Производительность	D (N), т/ч (МВт)	31,0 (20,2)	31,5 (20,5)	33,3 (21,7)
Рабочее давление насыщенного пара	$P_{\text{нп}}$, МПа	1,15	1,15	1,15
Температура питательной воды	$t_{\text{пв}}$, °C	106,7	106,5	106,5
Рабочее давление питательной воды	$P_{\text{пв}}$, МПа	1,53	1,53	1,53
Влажность топлива	W_t^r , %	26,74	26,74	26,74
Зольность топлива	A^r , %	0,45	0,45	0,45
Теплота сгорания	$Q_{\text{в}}$, МДж/кг	13,22	13,22	13,22
Температура первичного воздуха	$t_{\text{гв}}$, °C	80,0	80,0	80,0
Температура газов до и после водяного экономайзера	$\vartheta_{\text{эк}}/\vartheta_{\text{эк}}$, °C	244/168	236/168	231/168
Температура газов до и после воздухоподогревателя	$\vartheta_{\text{вп}}/\vartheta_{\text{вп}}$, °C	165/151	165/151	164/150
Избыток воздуха в уходящих газах	$\alpha_{\text{ух}}$	1,79	1,69	1,86
Потери тепла: с уходящими газами	q_2 , %	9,49	8,98	9,87
с химнедожогом	q_3 , %	0,01	0,01	0,01
с мехнедожогом	q_4 , %	0,13	0,13	0,14
в окружающую среду	q_5 , %	0,61	0,60	0,56
КПД котла брутто	$\eta_{\text{бр}}$, %	89,75	90,26	89,40
Полный расход древесного топлива	B, т/ч	6,121	6,177	6,593
Разрежение в топке	$S_{\text{т}}$, Па	185	180	165
Эмиссия NO_x	$\mathcal{E}_{\text{NO}_x}$, мг/МДж	64	62	67
Эмиссия CO	$\mathcal{E}_{\text{CO}}$, мг/МДж	12	12	11
Эмиссия взвешенных частиц	$\mathcal{E}_{\text{тв}}$, мг/МДж	62,84	57,08	60,83



Рис. 1. Фракционные остатки, характеризующие гранулометрический состав топливной смеси и двух ее взрывоопасных компонентов

Конструкция воздухоподогревателя дала возможность осуществить подогрев первичного воздуха до 79...81 °С. Продукты сгорания при прохождении через воздухоподогреватель охлаждались до 151...154 °С. Температура вторичного воздуха составляла 30...32 °С. Данные факторы обеспечили не высокий уровень температур обмуровки топочной камеры, которая не превышала 920 °С.

Сопротивление котлоагрегата по газовому тракту зависит от его нагрузки, доли рециркуляции продуктов сгорания и характеристик сжигаемого топлива. При проведении балансовых опытов суммарное сопротивление котлоагрегата с парогенератором, водяным экономайзером, золоуловителем и воздухоподогревателем изменялось в диапазоне 3,87...3,92 кПа. При этом сопротивление отдельных элементов составляло: 1,02...1,09 – топочной камеры с парогенераторами; 0,60...0,65 – водяного экономайзера; 1,29...1,30 – золоуловителя; 0,88...0,91 кПа – воздухоподогревателя.

Исследования гранулометрического состава очажных остатков, выполненные в соответствии с [2], показали, что летучая зола, отобранная из-под золоуловителя и воздухоподогревателя, имеет высокую степень полидисперсности гранулометрического состава ($n = 0,405$) и очень тонкодисперсный состав ($b = 0,207$). При этом в ней доминируют частицы с размером менее 45 мкм, массовая доля которых превышает 64 %. Данный гранулометрический состав летучей золы косвенно свидетельствует о высокой степени улавливания золоочистного оборудования. Исследования распределения горючих веществ по фракциям в летучей золе показали, что максимальное содержание горючих имеют частицы с размером 1000 мкм и более (рис. 2а). Однако их массовая доля в летучей золе мала, поэтому определяющее влияние на величину механического недожога топлива оказывает содержание горючих веществ в частицах $d_p < 45$ мкм (рис. 2б).

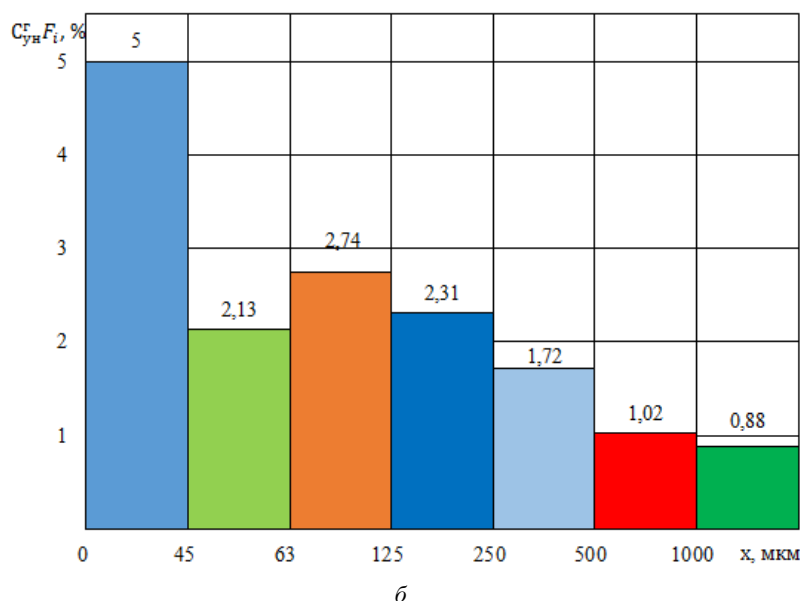
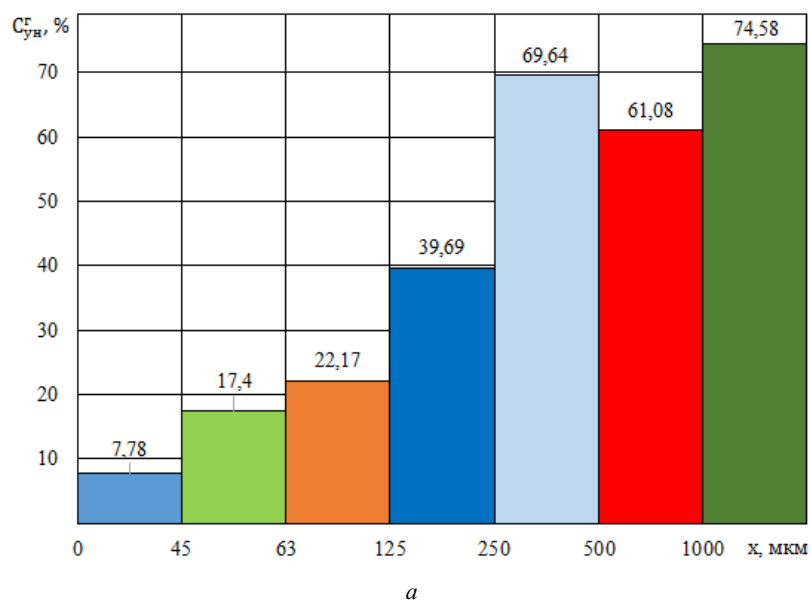


Рис. 2. Содержание горючих веществ в летучей золе:
а – пофракционное содержание горючих веществ;
б – содержание горючих с учетом массовых долей различных фракций

Зола и шлак, отобранные из-под топочной камеры, имеют неоднородный гранулометрический состав ($n = 0,537$), при этом в очаговых остатках доминируют частицы размером 250 мкм и более, массовая доля которых составляла 55,56 %.

Для определения запыленности дымовых газов и эффективности работы золоуловителя использовался метод внешней фильтрации [3]. Измерение и регулирование расхода отбираемых продуктов сгорания проводилось с помощью аспирационного устройства «ОП-442 ТЦ». Результаты замеров поля скоростей и концентраций твердой фазы в дымовых газах до водяного экономайзера показали, что структура газового потока в данном измерительном сечении не позволяет получить объективные результаты. Исходя из этого, для определения эффективности очистки дымовых газов от взвешенных частиц следует использовать массовый метод топливно-зольного баланса.

Структура газового потока в измерительном сечении газохода перед дымовой трубой позволяет получить объективные данные по концентрации твердой фазы в продуктах сгорания. Среднее значение концентрации взвешенных веществ в продуктах сгорания данного газохода составило 111,8 мг/м³ при нагрузке котлоагрегата 96 % от номинальной.

Выполненные исследования позволили определить значения эмиссий твердых частиц, которые составили 57,08...62,84 г/ГДж, при этом коэффициенты выбросов сажевых частиц изменялись в диапазоне 7,99...8,80 г/ГДж.

Анализ условий тепловой работы котлоагрегата показал, что потери тепла с уходящими газами имели умеренные значения (см. таблицу), что объясняется невысокой температурой уходящих газов. Конструкция наклонно-переталкивающей решетки и системы охлаждения ее рамы обеспечили отсутствие шлаковых наростов и надежную работу установки шлакоудаления при высокой полноте выгорания горючих веществ в очаговых остатках ($C_{\text{шл}}^* = 9,0 \%$, $C_{\text{ун}}^* = 15,8 \%$). Потери с физической теплотой шлака не превышали 0,02 %.

Для определения потерь тепла в окружающую среду использовался относительный метод [4], при этом ограждающие конструкции разбивались на отдельные участки, в каждом из которых с помощью пирометра измерялись средние температуры. На основании результатов замеров средних температур в 810 участках были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи, а затем потери тепла в окружающую среду. Удовлетворительное качество обмуровочных и теплоизоляционных материалов позволило обеспечить низкий уровень данной потери, которая для номинальной нагрузки котлоагрегата составила $q_5^{\text{ном}} = 0,54 \%$.

Выводы

1. Запуск в работу парового котлоагрегата PRD 22000 обеспечил достаточно экономичное энергетическое использование топливной смеси, состоящей

из дробленки фанеры, березовой коры, рубленного шпона, древесно-шлифовальной пыли и опилок с линии обрезки фанеры. КПД брутто котлоагрегата в исследованном диапазоне нагрузок составил 89,40 – 90,26 %, а удельный расход условного топлива на выработку 1 ГДж – 37,78...38,14 кг у.т.

2. Конструкция основного и вспомогательного оборудования котлоагрегата обеспечила его работу с высокими экологическими показателями, так концентрации вредных веществ, приведенные к коэффициенту избытка воздуха 1,4; составили: монооксида углерода 33–35; оксидов азота 142–154; твердых частиц 106,5–113,8 мг/м³.

3. Реализация проекта по энергетическому использованию отходов фанерного производства для выработки тепловой энергии значительно уменьшила загрязнение окружающей среды, а также в полном объеме обеспечила потребности завода в технологическом паре.

4. Энергообследование показало, что котлоагрегат PRD-22000 имеет резервы для дальнейшего повышения технико-экономических и экологических показателей.

Литература

1. Любов В.К., Романов А.Ю. Исследование характеристик древесно-шлифовальной пыли и опилок фанерного производства // Наука – Северному региону: сб. науч. тр. Архангельск. 2006. Вып. 67. С. 209–213.
2. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск, 2010. 496 с.
3. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л., 1987. 140 с.
4. Любов В.К., Малыгин П.В., Попов А.Н., Попова Е.И. Определение потерь тепла в окружающую среду на основе комплексного исследования эффективности работы котлов // Теплоэнергетика. 2015. №8. С. 36–40.

References

1. Liubov V.K., Romanov A.Iu. Issledovanie harakteristik drevsesno-shlifoval'noi py-li i opilkov fanernogo proizvodstva [Investigation of characteristics of wood-grinding dust and sawdust plywood production]. *Nauka – Severnomu regionu: sb. nauch. tr.* [Science – Northern region: collection of scientific works]. Arhangel'sk, 2006, Vol. 67, pp. 209–213.
2. Liubov V.K., Liubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopliv* [Improving the energy efficiency of the use of biofuels]. Arhangel'sk, 2010, 496 p.
3. *Sbornik metodik po opredeleniiu koncentracii zagriazniaiushchih veshchestv v promyshlennykh vybrosakh* [Collection of methods to determine the concentrations of pollutants in industrial emissions]. Leningrad, 1987, 140 p.
4. Liubov V.K., Malygin P.V., Popov A.N., Popova E.I. *Opredelenie poter' tepla v ok-ruzhaiushchuiu sredu na osnove kompleksnogo issledovaniia effektivnosti raboty kotlov* [Determination of heat loss to the environment based on a comprehensive study of the efficiency of boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2015, №8, pp. 36–40.