

УДК 620.91:504.062

© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор  
© А. М. Гримитлин, д-р техн. наук, профессор  
© В. Р. Таурит, д-р техн. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,  
taurit\_v\_r@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-125-131

© A. L. Shkarovskiy, Dr. Sci. Tech., Professor  
© A. M. Gritmitlin, Dr. Sci. Tech., Professor  
© V. R. Taurit, Dr. Sci. Tech., Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: szkarowski@mail.ru, grimitlin@avoknw.ru,  
taurit\_v\_r@mail.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ СЛОЕВОМ СПОСОБЕ СЖИГАНИЯ

### IMPROVING THE USE OF SOLID FUEL IN THE LAYERED COMBUSTION METHOD

Представлены результаты исследований, целью которых является повышение эффективности и качества использования твердого топлива при слоевом способе сжигания в котлах малой мощности. Для этого комплексно рассмотрены задачи повышения эффективности использования топлива, снижения загрязнения атмосферы и улучшения свойств шлака, упрощающие его дальнейшую переработку. В основу методологии работы положено использование активных добавок, вносимых непосредственно на слой горящего топлива. Действие добавок определено методами газового анализа и составления теплового баланса котла. Получены показатели работы котлов, которые доказывают эффективность метода. Разработаны рекомендации по внедрению метода в условиях слабо автоматизированных котельных при минимальных затратах на его реализацию. Научные и практические результаты работы дают возможность значительно повысить КПД котлов, снизить выбросы продуктов неполного сгорания в атмосферу, увеличить плотность шлака, снизить его объем и размываемость. Дополнительными эффектами социального характера являются улучшение условий работы операторов котельных и повышение культуры обслуживания котлов.

*Ключевые слова:* твердое топливо, слоевое сжигание, активные добавки, повышение эффективности, снижение загрязнения атмосферы.

The article presents the results of studies, the purpose of which is to improve the efficiency and quality of using solid fuel in the layered method of combustion in low-power boilers. In order to achieve this, there are considered the tasks of increasing the efficiency of fuel use, reducing atmospheric pollution and improving the properties of slag, simplifying its further processing. The methodology of work is based on the use of active additives applied directly to the burning fuel layer. The action of the additives was determined by the methods of gas analysis and the compilation of the heat balance of the boiler. There have been obtained boiler performance indicators, which prove the effectiveness of the method. Recommendations have been developed for the implementation of the method in the conditions of poorly automated boiler houses with minimal costs for its implementation. Scientific and practical results of the study make it possible to significantly increase the efficiency of boilers, reduce emissions of products of incomplete combustion into the atmosphere, increase the density of slag, and reduce its volume and erosion. An additional positive social effect is an improvement in the working conditions of boiler operators and an increase in the culture of boiler maintenance.

*Keywords:* solid fuel, layered combustion, active additives, increasing efficiency, reducing atmospheric pollution.

#### Введение

Каменный уголь, несомненно, постепенно теряет свои позиции в топливно-энергетическом балансе большинства стран. Особенно это относится к слоевому методу сжигания, характерному для котлов малой мощности. В Российской

Федерации в пределах газифицированных населенных пунктов котлы на твердом топливе вообще не эксплуатируются. Однако большое количество чугунных и стальных отопительных котлов с таким способом сжигания продолжают использоваться, в том числе в пригородах газифициро-

ванных населенных мест. В еще большей степени относится это к странам, традиционно ориентированным на этот вид топлива. Характерным примером является Польша, где твердое топливо остается основой топливно-энергетического баланса. Поэтому активные научные исследования в области повышения эффективности и качества слоевого сжигания каменного угля продолжают. На крайнюю необходимость таких разработок прямо указывают выводы докладов Совместной целевой группы по аспектам воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека Европейской экономической комиссии ООН<sup>1,2</sup>. Хотя второй доклад посвящен, главным образом, использованию древесины и угля непосредственно для отопления жилья, следует признать, что принципы сжигания топлива, воздействие выбросов на атмосферу и проблемы, связанные с остающимся шлаком и золой, в случае котлов малой мощности практически идентичны [1]. Достаточно упомянуть полное отсутствие устройств газоочистки. Внедрение усовершенствованных технологий слоевого сжигания угля дало бы реальную возможность недорогой модернизации действующего парка отопительных котлов малой мощности, которые, устарев морально и физически, в связи с рядом обстоятельств социально-экономического характера еще долгое время будут находиться в эксплуатации.

Одним из направлений исследований по повышению эффективности и экологичности сжигания твердого топлива является использование активных добавок (присадок) [2]. Влияя на широкий спектр процессов и явлений в самом топливе и пламени горящего топлива, такие вещества увеличивают скорость горения и полноту сгорания, обеспечивают повышение КПД котлов и уменьшают объем образующегося шлака. Однако традиционно такие разработки ориентированы на крупные, прежде всего энергетические котлы, где осуществляется сжигание

пылеугольным методом [3] или горение в кипящем слое [4]. Поэтому присадки в таких случаях добавляются к самому топливу и вместе с ним поступают в зону горения [5]. Но для котельных малой мощности с их ограниченными возможностями по хранению и предварительной подготовке топлива использование присадок практически неприменимо [6]. Для таких объектов вполне применимо технически и организационно периодическое внесение активных добавок непосредственно на слой горящего топлива по авторскому методу.

#### **Предмет исследования и постановка задачи**

Как это бывает в науке, существо описываемого явления было открыто случайно, когда некая комбинация химических веществ в лаборатории попала на раскаленный слой горящего кокса. Визуальный эффект и повышение тепловыделения были несомненными и настолько значительными, что это сразу не находило рационального объяснения на существующей научной базе.

Это событие стало началом в исследовании нового метода повышения эффективности использования твердого топлива при слоевом способе его сжигания. Патент РФ № 2011116 от 15.04.1994 «Способ слоевого сжигания твердого кускового топлива» [7] убедительно подтвердил новизну открытия, однако комплексной систематизированной проверке и обоснованию непосредственно в условиях действующих котельных метод не был подвергнут до описываемых в данной статье исследований.

Целью исследований было сравнение основных показателей эффективности сжигания твердого топлива (каменный уголь) в следующих условиях:

- при обычном слоевом способе сжигания;
- при активном воздействии на кинетику реакционной зоны с помощью твердой солевой добавки по авторскому методу.

Следующим этапом на основании результатов выполненных исследований стала разработка рекомендаций по внедрению метода с целью его широкого использования.

Количество добавки, способ и частота ее вбрасывания на поверхность горящего топлива были установлены путем предварительного моделирования [8], теоретических расчетов и лабораторных исследований и впоследствии кор-

<sup>1</sup> Совместный доклад 2014 года о деятельности международных совместных программ и Совместной целевой группы по аспектам воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека. Европейская экономическая комиссия. ECE/EB.AIR/WG.1/2014/3. Distr.: General 10 July 2014.

<sup>2</sup> Отопление жилья древесиной и углем: воздействие на здоровье человека и варианты политики в Европе и Северной Америке. Доклад Совместной целевой группы по аспектам воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека. Европейская экономическая комиссия. ECE/EB.AIR/WG.1/2014/6. Distr.: General 26 September 2014.

ректировались непосредственно в процессе экспериментальных исследований. Предварительно принятые для исследований показатели расхода добавки составили 5–7 г на 1 м<sup>2</sup> горящего слоя топлива каждые 5–10 минут, что эквивалентно 2,2–2,3 кг добавки на 1 т угля.

### Теоретическое обоснование

Авторы должны признаться, что, несмотря на значительно продвинувшиеся экспериментальные исследования и накапливающийся опыт практического применения технологии, точного теоретического объяснения существу происходящих процессов еще нет. Даже комбинацию реагентов, дающую наибольший эффект, еще предстоит уточнить.

Интересно отметить, что еще в русской древне рецептом на повышение тепловыделения при плохо разгорающихся сырых дровах в печи считалось вбрасывание щепотки поваренной соли. Однако это традиционно объясняется повышением светимости в характерной для натрия желтой части спектра. В исследуемой твердой солевой добавке также присутствуют соли натрия. Но, в отличие от приведенного исторического примера, описываемая технология характеризуется наибольшим эффектом при вбрасывании реагентов на уже раскаленную поверхность горящего топлива. Это явно указывает на термическое разложение компонентов добавки с образованием нового активного вещества. Причем это вещество настолько активно, что в реакции окисления, вероятно, вступают даже неорганические соединения топлива. На это указывает явное снижение объема шлака, а также повышение относительного эффекта применения технологии при повышенном содержании пустой породы [15].

Повышение КПД котла в некоторых экспериментах было настолько велико, что авторы были вынуждены поначалу отбрасывать эти результаты как недостоверные. Однако повторяемость таких результатов снова и снова требовала теоретического объяснения происходящих процессов, оцениваемых только по конечному результату.

Одно из направлений теоретических исследований авторов было сосредоточено на возможности образования NaOH при термической деструкции натрийсодержащих компонентов добавки [9]. Химическая активность едкого натрия могла бы в принципе объяснить резкий

рост количества радикалов в реакционной зоне с включением в реакции окисления не только всей органики топлива, но и неорганических компонентов пустой породы. Это направление было тем более привлекательно, если учесть, что именно на раскаленной поверхности горящего угля NaOH не только легко плавится ( $t_{пл} = 320\text{ }^\circ\text{C}$ ), но и испаряется ( $t_{кип} = 1378\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Совершенно новое направление теоретическим поискам может придать публикация по исследованиям расщепления высокомолекулярных силикатов [10]. Авторами статьи обоснована не только теоретическая возможность, но и практический способ получения значительного количества энергии в процессах расщепления высокомолекулярных силикатов при условии перехода химической стадии в физико-химическую цепную стадию. Примером такой реакции может быть расщепление высокомолекулярного силиката  $\text{Na}_2\text{O} \times 3\text{SiO}_2$ . Расщепляющим веществом является смесь карбида и нитрида кремния:  $\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4$ . Предварительный анализ показал наличие в реакционной зоне (рядовой каменный уголь плюс твердая солевая добавка) всех компонентов, необходимых для образования исходных веществ и последующего протекания реакции расщепления силиката [15].

Но для окончательного и достоверного теоретического обоснования действия твердой солевой добавки понадобятся еще обширные эксперименты с подробным химическим анализом, причем как самого слоя горящего топлива, так и газовой среды над ним.

### Условия эксперимента и задачи исследований

Объектом исследования была выбрана действующая отопительная котельная пансионата «Заря» (пос. Репино Выборгского района Ленинградской области). Для большей представительности результатов испытывались два типа котлов, характерных для малых отопительных котельных:

- чугунный отопительный котел «Тула-1»;
- стальной водогрейный котел конструкции ЦКТИ.

В качестве метода исследований были применены балансовые испытания котла с полным газовым анализом продуктов сгорания. Метод был многократно применен и усовершенствован авторами в производственных условиях [11]. Измерения выполнялись с помощью компью-

теризованного анализатора дымовых газов «Optima 7» (Германия). Известно, что большинство анализаторов определяют не коэффициент избытка воздуха, а коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания [12]. При малых избытках воздуха эти показатели мало отличаются, но с ростом избытка воздуха при слоевом сжигании топлива в малых котлах отличие становится все более значительным. Этот факт учитывался в расчетах соответствующим образом [13].

Характеристики топлива:

- вид топлива: каменный уголь Донецкого бассейна;
- удельная теплота сгорания:  $Q_p^H = 5800$  ккал/кг (24,3 МДж/кг);
- максимальное содержание трехатомных газов в продуктах сгорания:  $RO_2^{max} = 18,7$  %об.;
- удельный объем продуктов сгорания:  $V_{пс}^0 = 1,18$  м<sup>3</sup>/кг.

Топливо сжигалось обычным слоевым способом на неподвижной колосниковой решетке по технологии загрузки, принятой в данной котельной. Никакой предварительной подготовки или сортировки топлива не проводилось. Для объективного выявления эффективности присадки котлы испытывались в том состоянии, в котором они находились к моменту начала исследований.

**Результаты исследований и их анализ**

Применение активной присадки в обоих случаях более чем вдвое снижало приведенную к  $\alpha = 1,0$  концентрацию оксида углерода в дымовых газах: на котле ЦКТИ — с 2871 ppm (0,29 %об.)

до 1320 ppm (0,13 %об.); на котле «Тула-1» — с 2862 ppm (0,29 %об.) до 1243 ppm (0,12 %об.).

Характерные примеры из многочисленных рабочих распечаток газоанализатора для обоих котлов приведены на рис. 1 и 2.

Значительное снижение коэффициента избытка воздуха (на 20–25 %) при прочих равных условиях косвенно свидетельствует о более глубоком выгорании той части массы топлива, которая при обычном методе сжигания теряется с химическим и механическим недожогом (потери теплоты  $q_3$  и  $q_4$ ) и методом газового анализа прямо не определяется. На котле «Тула-1» величина  $\alpha$  снизилась с 11,3 до 8,5 (котел находился в очень плохом техническом состоянии), а на котле ЦКТИ — с 4,9 до 4,1.

Прямым свидетельством повышения эффективности использования топлива явилось снижение потерь теплоты с отходящими газами ( $q_2$ ), что почти автоматически означает повышение КПД котла на такую же величину:

- на котле ЦКТИ — на 2,5 %;
- на котле «Тула-1» — на 12 %.

Было установлено также стабильное снижение выбросов оксидов азота, составившее:

- 10 % на котле ЦКТИ (с 290 до 260 ppm по концентрации NO, приведенной к  $\alpha = 1,0$ );
- 30 % на котле «Тула-1» (с 315 до 220 ppm).

Таким образом, было экспериментально подтверждено, что активное реагентное воздействие на кинетику зоны горения с помощью твердой солевой добавки по авторскому методу является

a) Fuel: ANTHRACITE		b) Fuel: ANTHRACITE	
154.9 °C	FlueGas.Temp	153.3 °C	FlueGas.Temp
1.7 %	CO2 content	2.4 %	CO2 content
43.8 %	FlueGasLoss	32.7 %	FlueGasLoss
11.73	Excess air	8.69	Excess air
19.2 %	O2 -content	18.6 %	O2 -content
244 ppm	CO -content	143 ppm	CO -content
2862 ppm	CO undil.	1243 ppm	CO undil.
----- hPa	FlueDraught	----- hPa	FlueDraught
27 ppm	NO -content	25 ppm	NO -content
29 ppm	NOx content	27 ppm	NOx content
11.5 °C	Amb.Air.Temp	11.5 °C	Amb.Air.Temp
56.2 %	Efficiency	67.3 %	Efficiency

Рис. 1. Пример рабочих результатов испытаний котла «Тула-1»: а — при сжигании каменного угля обычным способом; б — при использовании твердой солевой добавки

a) Fuel: ANTHRACITE		b) Fuel: ANTHRACITE	
114.0 °C	FlueGas.Temp	113.3 °C	FlueGas.Temp
4.1 %	CO2 content	4.8 %	CO2 content
18.6 %	FlueGasLoss	15.5 %	FlueGasLoss
5.02	Excess air	4.23	Excess air
16.8 %	O2 -content	16.0 %	O2 -content
572 ppm	CO -content	312 ppm	CO -content
2871 ppm	CO undil.	1320 ppm	CO undil.
----- hPa	FlueDraught	----- hPa	FlueDraught
52 ppm	NO -content	67 ppm	NO -content
55 ppm	NOx content	70 ppm	NOx content
11.5 °C	Amb. Air.Temp	11.5 °C	Amb. Air.Temp
81.4 %	Efficiency	84.5 %	Efficiency

Рис. 2. Пример рабочих результатов испытаний котла ЦКТИ: а — при сжигании каменного угля обычным способом; б — при использовании твердой солевой добавки

перспективным способом комплексной высокоэффективной технологии энергоэкологической реабилитации действующего теплотехнического оборудования.

При слоевом сжигании каменного угля он используется более эффективно, что влечет за собой возможность экономии до 15–20 % твердого топлива в год. Содержание в топливе так называемой пустой породы, то есть ухудшение его качества, даже повышает относительный эффект применения метода.

Выбросы окиси углерода в атмосферу гарантированно снижаются в два раза и более, а выбросы оксидов азота — до 30 %. Такой значительный экологический эффект сравним с технологией впрыска водяного пара в зону горения [14].

Дополнительным положительным результатом применения технологии является уменьшение объема шлака в 2–2,5 раза. Это совершенно новое явление, имеющее долговременный экологический эффект. Переход твердого остатка в более плотное состояние обеспечивает его меньшую размываемость атмосферными осадками. В результате этого достигается снижение переноса в почву и грунтовые воды вредных веществ, включая имеющиеся в шлаках соли тяжелых металлов.

Если принять во внимание значительное увеличение интервала времени между очередными загрузками топлива, то при отмеченном сокращении объема шлака трудозатраты обслуживающего персонала на загрузку топлива и удаление

шлака также могут сократиться ориентировочно на 30–50 %, что представляет собой дополнительный социальный эффект применения технологии.

Уточнение полученных методами газового анализа предварительных результатов требует дальнейших экспериментов методами полных балансовых испытаний котла. Однако не вызывает сомнения, что следующий этап исследования может еще более увеличить показатели приведенных выше эффектов.

#### Выводы

1. Активное реагентное воздействие на кинетику зоны горения по авторскому методу имеет все признаки комплексной высокоэффективной технологии энергоэкологической реабилитации действующего теплотехнического оборудования. Известные в мировой научно-технической практике технологии активных добавок к твердому топливу основаны на применении сложных и дорогих металлоорганических соединений, дающих к тому же односторонний эффект по улучшению каких-либо отдельных характеристик горения. Предлагаемая технология обеспечивает комплексный характер оптимизации сжигания топлива, очень недорого при серийном внедрении и относится к полностью импортозамещающим разработкам.

2. При слоевом сжигании каменного угля он используется более эффективно, что влечет за собой возможность экономии до 15–20 % твердого топлива.

3. Выбросы окиси углерода в атмосферу гарантированно снижаются вдвое, а выбросы оксидов азота — до 30 %.

4. Уточнение полученных методами газового анализа предварительных результатов требует дальнейших экспериментов методами полных балансовых испытаний котла. Следующий этап исследований может еще более увеличить показатели приведенных выше эффектов.

### Библиографический список

1. Janta-Lipińska S., Szkarowski A. The study on decreasing of nitrogen oxides emission carried out on DKVR 10-13 industrial heating boilers // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 44. 10<sup>th</sup> Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018. Issue 00056. 8 p.

2. Syed A. et al. Performance Evaluation of Boron/Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Solid Fuels Containing Activated Charcoal // Journal of Spacecraft and Rockets. 2020. Vol. 58 (4). 12 p.

3. Filkoski R. et al. 3-D Modelling of Pulverised-coal Combustion in Power Boiler with Tangential Furnace // 6th International Conference “Power Engineering Research Problems”, Warsaw, 2003. 10 p.

4. Saxena S. C., Jotshi C. K. Fluidized-bed incineration of waste materials // Progress in Energy and Combustion Science. 1994. Vol. 20. Issue 4. Pp. 281–324.

5. Sindhu P. et al. Different load during energy audit of thermal power plant // International Journal of Exploring Emerging Trends in Engineering. 2014. Vol. 1 (4). Pp. 69–79.

6. Khare S. et al. Retrofitting of a Conventional Coal Fired Plant to Oxy-Firing: Heat Transfer Impacts for the Furnace and Associated Oxygen Levels // 5<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion. The University of Adelaide, Adelaide, Australia, 17–20 July 2005. Pp. 109–112.

7. Пат. 2011116, Российская Федерация, МПК F23B 90/00. Способ слоевого сжигания твердого кускового топлива / О. Б. Егорова. № 4837125/06, заявл. 12.06.1990, опубл. 12.04.1994.

8. Pavlenko A., Szkarowski A., Koshlak H. Modeling of Combustion Processes water-oil emulsion // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No 1. Pp. 128–131.

9. Петров С. А. Высокотемпературная химия неорганических оксидов. Синтез и физико-химические свойства // ИХС РАН — 80 лет. Современные проблемы неорганической химии / под общ. ред. академика В. Я. Шевченко. СПб.: Арт-Экспресс, 2016. С. 294–308.

10. Куликов А., Ковылянский Я. Новый вид топлива для энергетики // Энергетик. 1993. № 9. С. 24–25.

11. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A. Investigations of Advantages of Simultaneous Combustion of Natural

Gas and Mazout in Medium Power Steam Boilers // Journal of Engineering Thermophysics. 2020. Vol. 29 (2). Pp. 331–337.

12. Szkarowski A. Paliwa Gazowe. Podstawy efektywnego i ekologicznego wykorzystania. Warszawa: PWN, 2020. 150 s.

13. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Kolienco A. Gas quality control as a tool of energy saving // Gas, Water and Sanitary Engineering. 2013. No 4. Pp. 146–150.

14. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A. Investigations of nitric oxides reduction in industrial-heating boilers with the use of the steam injection method // Archives of Environmental Protection. 2020. Vol. 46 (2). Pp. 100–107.

15. Сердюк В., Ашкинази Л. К «ЕВРО» с катализаторами горения... // Newchemistry.ru. URL: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=125](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=125).

### References

1. Janta-Lipińska S., Szkarowski A. The study on decreasing of nitrogen oxides emission carried out on DKVR 10-13 industrial heating boilers. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 44. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018*, iss. 00056, 8 p.

2. Syed A. et al. Performance Evaluation of Boron/Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Solid Fuels Containing Activated Charcoal. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, vol. 58 (4), 12 p.

3. Filkoski R. et al. 3-D modeling of pulverised-coal combustion in power boiler with tangential furnace. *Proceedings of the 6-th International Conference “Power Engineering Research Problems”*, Warsaw, 2003, 10 p.

4. Saxena S. C., Jotshi C. K. Fluidized-bed incineration of waste materials. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1994, vol. 20, iss. 4, pp. 281–324.

5. Sindhu P. et al. Different load during energy audit of thermal power plant. *International Journal of Exploring Emerging Trends in Engineering*, 2014, vol. 1 (4), pp. 69–79.

6. Khare S. et al. Retrofitting of a conventional coal fired plant to oxy-firing: heat transfer impacts for the furnace and associated oxygen levels. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion. The University of Adelaide, Adelaide, Australia, 17–20 July 2005*, pp. 109–112.

7. Egorova O. B. *Sposob sloevogo szhiganiya tverdogo kuskovogo topliva* [Method of stratified combustion of solid lumpy fuel]. Patent RF no. 2011116, 1994.

8. Pavlenko A., Szkarowski A., Koshlak H. Modeling of combustion processes water-oil emulsion. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no 1, pp. 128–131.

9. Petrov S. A. *Vysokotemperaturnaya khimiya neorganicheskikh oksidov. Sintez i fiziko-khimicheskie svoystva* [High-temperature chemistry of inorganic oxides. Synthesis and physicochemical properties]. *IKhS RAN* —

80 let. *Sovremennye problemy neorganicheskoy khimii* [In: IÖS RAS is 80 years old. Modern problems of inorganic chemistry]. Ed. by Shevchenko V. Ya. St. Petersburg, Art-Ekspress Publ., 2016, pp. 294–308.

10. Kulikov A., Kovylyanskiy Ya. *Noviy vid topliva dlya energetiki* [New kind of fuel for power engineering]. *Energetik – Power Engineer*, 1993, no. 9, pp. 24–25.

11. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A. Investigations of advantages of simultaneous combustion of natural gas and mazout in medium power steam boilers. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, vol. 29 (2), pp. 331–337.

12. Szkarowski A. *Paliwa Gazowe. Podstawy efektywnego i ekologicznego wykorzystania*. Warszawa, PWN Publ., 2020, 150 p.

13. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Kolienco A. Gas quality control as a tool of energy saving. *Gas, Water and Sanitary Engineering*, 2013, no 4, pp. 146–150.

14. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A. Investigations of nitric oxides reduction in industrial-heating boilers with the use of the steam injection method. *Archives of Environmental Protection*, 2020, vol. 46 (2), pp. 100–107.

15. Serdyuk V., Ashkinazi L. *K «EVRO» s katalizatorami goreniya* [Towards “EURO” with combustion catalysts]. *Newchemistry.ru*. Available at: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=125](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=125).