



ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЫГОРАНИЕ ЧАСТИЦ МАЗУТА В ТОПКАХ КОТЛОВ

М.А. Таймаров¹, Р.В. Ахметова¹, С.М. Маргулис¹, Л.И. Касимова²

¹Казанский государственный энергетический университет,

²Казанский национальный исследовательский технологический университет

Резюме: Сложности сжигания обводненного мазута, применяемого на ТЭС в качестве резервного топлива для котлов, связаны с его подготовкой путем нагрева для снижения вязкости и выбором способа распыливания с помощью форсунок в зону горения. Влияющее на КПД котла качество подготовки мазута к сжиганию оценивается по величине длины факела, наличию горящих крупных частиц мазута, набросу коксовых и несгоревших частиц на экранные и другие тепловоспринимающие поверхности. Одним из способов подготовки мазута к сжиганию является кавитационная обработка, в результате которой получается эмульсия, состоящая из мелкодисперсных частиц микронного размера. Нагрев частиц мазута после форсунки при попадании в зону горения происходит за счет потока излучения от горящего факела. Поэтому в настоящей работе экспериментально определены значения плотности потока от факела при сжигании мазута. Рассмотрено влияние размера частиц на скорость горения мазута М100 при различной плотности теплового излучения факела. Получено, что эффект кавитационной обработки мазута на скорость горения наиболее существенно проявляется при размерах частиц менее 10 мкм. Для этой цели при больших расходах мазута преимущественным является применение гидродинамических кавитаторов.

Ключевые слова: кавитационная обработка, мазут, горение, частицы, тепловой радиационный поток, факел, топка, котел, скорость горения, эмульсия.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59

Для цитирования: М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, С.М. Маргулис, Касимова Л.И. Влияние кавитационной обработки на выгорание частиц мазута в топках котлов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 52-59. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59.

THE EFFECT OF CAVITATION TREATMENT ON THE EXTINGUISHING OF PARTICLES OF OILS IN FUEL BOILERS

M.A. Taymarov¹, R.V. Akhmetova¹, S.M. Margulis¹, L.I. Kasimova²

¹Kazan state power engineering university

²Kazan national research technological university

Abstract: The difficulties of burning the watered fuel oil used at the TPP as a reserve fuel for boilers are associated with its preparation by heating to reduce viscosity and the choice of a method of spraying with nozzles into the combustion zone. The quality of the preparation of fuel oil for combustion affecting the boiler efficiency is estimated by the length of the flame,

the presence of burning large particles of fuel oil, the injection of coke and unburned particles onto screen and other heat-receiving surfaces. One of the ways to prepare fuel oil for combustion is cavitation treatment, which results in an emulsion consisting of fine micron-sized particles. Heating of fuel oil particles after the nozzle in contact with the combustion zone is due to the flow of radiation from the burning torch. Therefore, in this article, the values of the flux density from the torch during the combustion of fuel oil are experimentally determined. The influence of particle size on the burning rate of the fuel oil M100 with the different density of the thermal radiation of the flame. It is found that the effect of cavitation treatment of fuel oil on the combustion rate is most significantly manifested in particle sizes less than 10 microns. For this purpose, the use of hydrodynamic cavitators are preferred at high fuel oil consumption rate.

Keywords: *cavitation treatment, fuel oil, combustion, particles, heat radiation flow, torch, furnace, boiler, burning rate, emulsion.*

For citation: *M.A. Taymarov, R.V. Akhmetova, S.M. Margulis, L.I. Kasimova The effect of cavitation treatment on the extinguishing of particles of oils in fuel boilers // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 52-59. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-52-59.*

Введение

В процессе хранения мазут обводняется и содержание воды в мазуте М100 может достигать до 11 % по массе [1–3]. Сжигание такого мазута с применением форсунок ФУЗ-5000 в котлах ТГМ-84Б без кавитационной обработки сопровождается значительной длиной факела, набросом его на задний экран и горением крупных частиц в хвостовой части факела. Эти нежелательные факторы приводят к снижению КПД котлов и вызывают перерасход топлива на выработку электрической и тепловой энергии на ТЭС [2]. При хранении более 10 лет мазут не соответствует ГОСТ 10585-2013, так как из него испаряются легкие углеводороды, происходит обводнение мазута и загрязнение механическими примесями.

Исследования [4–7] показали, что кавитационная обработка позволяет получить водомазутную эмульсию с малым размером частиц, горение которых в факеле происходит с более высокой скоростью по сравнению со сжиганием по типовой схеме без кавитационной обработки. Однако кавитационная обработка мазута сопровождается значительными энергетическими затратами на работу кавитаторов [10–12]. Среди кавитаторов перспективным является струйный гидродинамический кавитатор, конструкция которого характеризуется более низкими энергетическими затратами на его работу. Кавитационная обработка мазута при снижении энергетических затрат на работу кавитаторов является перспективным направлением в области разработки технологий для эффективного сжигания жидкого топлива в котлах ТЭС.

Описание объектов исследования и методики исследования

На интенсивность выгорания капель мазута значительное влияние оказывает плотность теплового потока от факела. В данной работе по методике [2] экспериментально исследовались значения плотности теплового потока от факела при сжигании мазута М100 в котлах ТГМ-84Б филиала АО «Татэнерго» Набережночелнинской ТЭЦ. Котел ТГМ-84Б – барабанный, производительностью 420 т/ч, с двухсветным экраном. Шесть горелок ГМУ-45 с единичной мощностью по 50 МВт расположены на фронтальной стене в два яруса: первый нижний ярус имеет 4 горелки, второй ярус имеет 2 горелки. Крутка воздуха в горелках – тангенциальная периферийная с углом наклона лопаток 45° и параметром крутки 1,049. Форсунки для сжигания мазута

– паромеханические ФУЗ-5000. Измерения плотности потока от факела проводились при помощи радиометра полного излучения ТЕРА-50 с градуировкой РК-15. Режимные параметры работы котлов определялись по штатным приборам.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 показаны экспериментальные изорады – кривые равных тепловых потоков от факела, построенные по результатам измерений радиометром ТЕРА-50 через лючки в стенах топки котла ТГМ-84Б при сжигании мазута М100 с содержанием воды 5,2 % без кавитационной обработки.

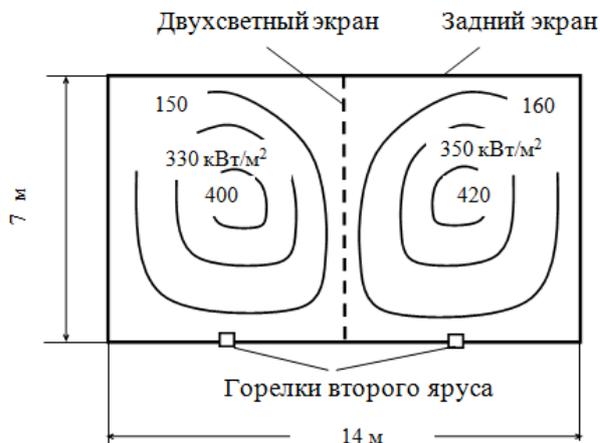


Рис. 1. Изорады тепловых потоков от факела $q_{\text{л}}$ по поперечному сечению топки на отметке 11,2 м котла ТГМ-84Б филиала АО «Татэнерго» Набережночелнинской ТЭЦ при сжигании в паромеханических форсунках ФУЗ-5000 мазута М100 с влажностью 5,2 % при паровой нагрузке 405 т/ч без кавитационной обработки

Как видно из рис. 1, в правой части, по отношению к двухсветному экрану, значения тепловых потоков $q_{\text{л}}$ несколько выше. В зависимости от величины падающего на каплю мазута теплового потока от факела изменяется время ее выгорания. Приведенные на рис. 1 значения лучистых тепловых потоков относятся к горению крупных частиц мазута.

На рис. 2 показана фотография пламени у заднего экрана, выполненная через боковые лючки правой стены на отметке высоты топки 11,2 м котла ТГМ-84Б при сжигании мазута М100 с влажностью 5,2 % без кавитационной обработки.

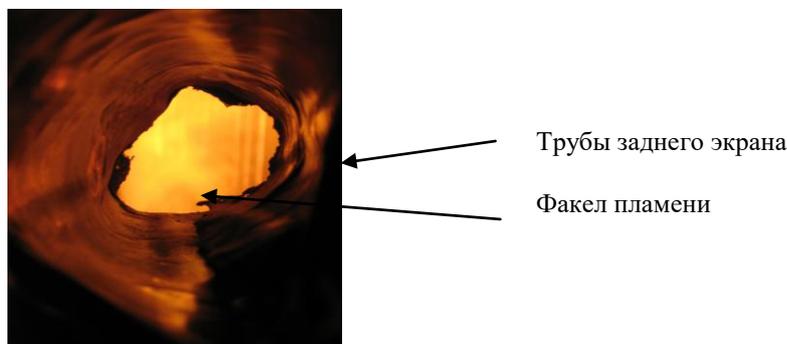


Рис. 2. Вид пламени у заднего экрана топки котла ТГМ-84Б на отметке 11,2 м при сжигании мазута М100 без кавитационной обработки

Как видно из рис. 2, при отсутствии кавитационной обработки догорание частиц мазута происходит непосредственно вблизи экранных труб с образованием светящегося факела из горящих сажистых частиц. Значительное количество частиц не сгорает и оседает на экранные трубы в виде темных пятен, что приводит к снижению КПД котлов.

Расчет времени выгорания частиц мазута при изменении их диаметра и падающего теплового потока от факела проводился по методике [8–9]. Количество кислорода, диффундирующее к шаровой поверхности капли мазута, пропорционально квадрату ее диаметра. Горение на некотором удалении от капли мазута происходит с большей скоростью по сравнению с такой же частицей твердого топлива, при горении которого химическая реакция практически протекает на самой поверхности.

Расчет времени выгорания капли проводился по формуле

$$\tau = \frac{\rho[(t_k - t_0)c_{cp} + \lambda_{п}]}{q_{л}} r_0, \quad (1)$$

где τ – время полного выгорания капли, с; ρ – плотность мазута, кг/м³; c_{cp} – средняя теплоемкость мазута, кДж/(кг·К); t_k и t_0 – температура кипения и начальная температура мазута, °С; $\lambda_{п}$ – теплота испарения мазута, кДж/кг; r_0 – начальный радиус капли, м; $q_{л}$ – интенсивность излучения пламени, воспринимаемая каплей мазута на поверхности, кВт/м² [9].

За счет кавитационной обработки могут быть получены частицы мазута М100 с относительно малыми радиусами. При кавитации высоко обводненный мазут в рабочей зоне кавитатора подвергается воздействию, при котором вода мгновенно переходит в паровую фазу, а затем возвращается в жидкое состояние с мелкодисперсным ее распределением по всей массе водомазутной эмульсии.

В малых частицах эмульсии, образующейся после кавитации, при попадании в топку происходит резкое вскипание воды с разрывом внешней углеводородной мазутной оболочки и осуществляется дробление частиц на более мелкие элементы. При этом площадь поверхности мазута с кислородом воздуха многократно возрастает и горение мазута происходит более интенсивно с образованием малого количества промежуточных продуктов.

При отсутствии кавитационной обработки средний диаметр частиц воды составляет около 60 мкм, а после кавитационной обработки – в среднем около 6 мкм.

В табл. 1 приведены результаты расчетов времени выгорания капель мазута М100 τ (сек) с влажностью 5,2 % в зависимости от их радиуса r_0 и величины падающего от факела лучистого потока $q_{л}$ при паровой нагрузке 405 т/ч для котла ТГМ-84Б в сравнении с вариантом без кавитационной обработки.

Таблица 1

Время выгорания капель мазута М100 τ (сек) с влажностью 5,2 % в зависимости от их радиуса r_0 при кавитационной обработке и величины падающего от факела лучистого потока $q_{л}$ для паровой нагрузки 405 т/ч

Радиус частиц r_0 , мкм	Плотность потока излучения $q_{л}$, кВт/м ²					
	150	330	400	160	350	420
30*	0,074	0,034	0,028	0,069	0,032	0,026
12	0,030	0,013	0,011	0,028	0,013	0,010
6	0,015	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,014	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
3	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
* – без кавитационной обработки						

Как видно из табл. 1, наблюдается линейная зависимость между уменьшением

размера капель мазута при кавитационной обработке и сокращением времени выгорания

Для центральной зоны факела с уровнем теплового потока 330 кВт/м^2 и выше (см. рис. 1) время выгорания капле обводненного мазута τ без кавитационной обработки можно оценить величиной $0,030 \dots 0,035$ сек, а при использовании кавитационной обработки $3 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3}$ сек.

Однако наличие в топке зон со значением тепловых потоков ниже 150 кВт/м^2 заметно увеличивает время полного выгорания капле мазута при использовании кавитационной обработки, а при ее отсутствии служит причиной наброса несгоревших капле мазута на задний экран в котлах ТГМ-84Б (см. рис. 2).

На рис. 3 показаны данные по распределению тепловых потоков от факела $q_{\text{л}}$ и времени выгорания частиц мазута τ по высоте h для центра топки котла ТГМ-84Б при паровой нагрузке 405 т/ч .

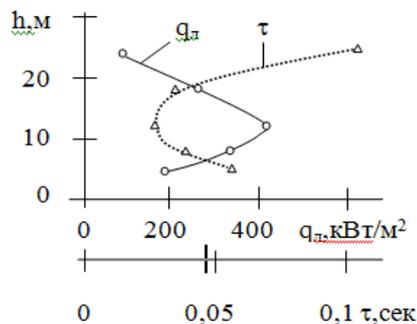


Рис. 3. Распределение тепловых потоков от факела $q_{\text{л}}$ и времени выгорания τ частиц мазута с диаметром капле 60 мкм по высоте h для центра топки котла ТГМ-84Б при паровой нагрузке 405 т/ч без кавитационной обработки

Из рис. 3 видно, что на выходе из топки, соответствующей отметке высоты $h = 25 \text{ м}$, тепловые потоки $q_{\text{л}}$ не превышают 100 кВт/м^2 и для частиц с диаметром капле 60 мкм время выгорания τ составляет $0,11$ сек. При средней скорости движения продуктов сгорания в топке 5 м/сек время пребывания несгоревших частиц мазута на выходе из топке соизмеримо с их скоростью выгорания $\tau = 0,11$ сек при значении излучения факела $q_{\text{л}} = 100 \text{ кВт/м}^2$ при отсутствии кавитационной обработки.

Поэтому сжигание мазута без кавитационной обработки мазута сопровождается отложением сажистых частиц несгоревшего мазута не только на экранных трубах топки, имеющих температуру около 340°C , но и далее по газоходу котлов, особенно на поверхностях нагрева воздухоподогревателя.

Для снижения времени выгорания частиц мазута наиболее эффективным является применение гидродинамических кавитаторов с предлагаемой проточной частью в виде спиральных геликоидных каналов (рис. 4).

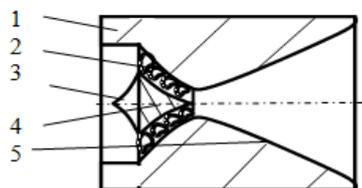


Рис. 4. Спиральный геликоидный кавитатор: 1 – корпус; 2 – спиральные геликоидные каналы; 3 – входной обтекатель; 4 – направляющий гиперболический конус; 5 – выходной диффузор

Подвергаемый кавитационной обработке мазут подается под давлением 6 МПа на входной обтекатель 3, который распределяет мазут по каналам 2.

Сужающиеся спиральные геликоидные каналы 2 закручены по поверхности направляющего гиперболического конуса 4 с увеличивающимся шагом. В каналах 2 происходит ускорение потока мазута, а при выходе в диффузор 5 в результате резкого падения давления происходит явление кавитации, при котором образуется мазутная эмульсия, представляющая собой двухфазную жидкостнопаровую систему: в парах мазута взвешены мельчайшие капельки мазута.

Выводы

Кавитационная обработка мазута позволяет эффективно сжигать в котлах ТГМ-84Б высоко обводненный мазут при диаметрах капель эмульсии менее 12 мкм при плотности тепловых потоков от факела более 150 кВт/м².

Литература

1. Якименко К.Ю., Венгеров А.А., Бранд А.Э. Применение технологии гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности транспортировки // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 5-3. С. 531–536.
2. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., Салтанаева Е.А., Хусаинов Д.Г. Исследование режимных параметров работы котлов при сжигании мазута с повышенным содержанием воды. // *Вестник КГЭУ*. 2017. №2(34). С.68–75.
3. Курочкин А.К. Технология безостаточной переработки содержащего тяжелые фракции газового конденсата. // *Экологический вестник России*. 2016. № 8. С. 12–23.
4. Курочкин А.К., Шишкин В.С. Малые установки для производства дизтоплив из газоконденсатов и малосернистых нефтей. // *Нефть и газ*. 2014. №1. С. 58–65.
5. Стребков Д.С. Исследование дисперсионных жидкостных систем при кавитационной обработке гидротоплив // *Трактора и сельхозмашины*. 2013. №6. С. 24–27.
6. Таймаров М.А., Салтанаева Е.А. Сжигание обводненного мазута в котлах ТЭС // *Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» 26–28 апреля 2017. Казань, 2017. Т. 2, с. 52.*
7. Gelderen Laurens, Malmquist, Linus M.V., Jomaas Grunde. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. *Fuel*, vol. 191, pp. 528–537. Available: 2017.
8. Катин В.Д., Вольхин И.В., Ахтямов М.Х., Криштоп В.В., Свириг Г.А. Новые установки для приготовления водомазутных эмульсий к малоотходному сжиганию в паровых и водогрейных котлах предприятий железнодорожного транспорта // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 3 (часть 3). С. 495–500.
9. Taumarov M.A., Akhmetova R.V., Safin R.G. Calculation of Fuel Oil Drop Burnup Time Dependence on Intensity of Flame Radiation // *Research Journal of Applied Sciences*, 2016 Volume: 11, P. 1660–1665.
10. Ивченко В.М. Кавитационная технология / Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф./ Под ред. Г.В. Логвиновича. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
11. Зубрилов С.П. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах / С.П. Зубрилов, В.М. Селиверстов, М.И. Браславский. Л.: Судостроение, 1988. 80 с.
12. Стребков Д.С. Исследование дисперсионных жидкостных систем при кавитационной обработке гидротоплив / Д.С. Стребков, Ю.А. Кожевников, В.В. Сербин, Ю.М. Щекочихин, В.Г. Николаев. // *Трактора и сельхозмашины*. 2013. №6. С. 24–27.
13. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Булгаков А.Б., Морозова Е.А. Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96 // *Теплоэнергетика*. 2006. № 6. С. 31–35.
14. Девисилов В.А. Теория горения и взрыва: учебное пособие для вузов. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.

15. Kadota T.; Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion// Progress in energy and combustion science Том: 28 Выпуск: 5 Стр.: 385–404 Номер статьи: PII S0360-1285(02)00005-9 Опубликовано: 2002.

16. Пат. № 2516638 РФ, МПК В 05 В 1/34. Кавитатор / Таймаров М.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КГЭУ. Опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

17. Арсенкин А.М. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 331 с.

18. Кнорре Г.Ф., Палеев И.И. Теория топочных процессов. М.: Энергия, 1966. 476 с.

19. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 296 с.

20. Таймаров М.А. Расчет параметров выгорания капли мазута. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012614536 от 21 мая 2012 г.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Ахметова Римма Валентиновна – старший преподаватель кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ahmetova_rv@bk.ru.

Маргулис Сергей Михайлович – канд. техн наук, заведующий кафедрой «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: msergey1952@gmail.com.

Касимова Лейсан Ильгизаровна – аспирант КНИТУ. E-mail: k.lays@yandex.ru.

References

1. Yakimenko K.Yu., Vengerov A.A., Brand A.E. Application of the technology of high-viscosity oil transportation in order to increase the efficiency of transportation. // Fundamental research. 2016. № 5-3. P. 531–536.

2. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Sungatullin R.G., Sultanaeva E. A., Khusainov, D.G. Investigation of operational parameters of the boilers when burning fuel oil with high water content.// Vestnik KGEU. 2017. № 2(34). P. 68–75.

3. Kurochkin A.K. Technology of residual-free processing of gas condensate containing heavy fractions. // Ecological Bulletin of Russia. 2016. № 8. P. 12–23.

4. Kurochkin A.K., Shishkin V.S. Small installations for the production of diesel fuel from gas condensates and low-sulfur oils. // Oil and Gas. 2014. №1. P. 58–65.

5. Strebkov D.S. the Study of dispersive liquid systems when the cavitation processing hydrotopes // Tractors and agricultural machinery. 2013. № 6. P. 24–27.

6. Taymarov M.A., Sultanaeva E.A. Burning watered fuel oil in the boilers of thermal power plants. // Proceedings of the XII international youth scientific conference "Tinchurin readings" April 26-28, 2017. Kazan, 2017. Vol. 2, P. 52.

7. Gelderen Laurens, Malmquist, Linus M.V., Jomaas Grunde. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. Fuel, vol. 191, p. 528–537. Available: 2017.

8. Katin V.D., Volkhin I.V., Akhtyamov M.X, Krysh-top V.V., Svirin G.A. New installations for preparation of water-oil emulsions for low-waste combustion in steam and hot-water boilers of the enterprises of railway transport. // Fundamental study. 2016. №. 3 (part 3). P. 495–500.

9. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Safin R.G. Calculation of Fuel Oil Drop Burnup Time Dependence on Intensity of Flame Radiation // Research Journal of Applied Sciences. 2016. Volume: 11, P. 1660–1665.

10. Ivchenko V.M. Cavitation technology / Ivchenko, V. M., Kulagin, V. A., Nemchin, A. F., V. Logvinovich, ed. Krasnoyarsk: Publishing house of KSU, 1990. 200 sec.
11. Zubrilov S.P. Ultrasonic cavitation treatment of fuels on ships / S.P. Zubrilov, V.M. Seliverstov, M. I. Braslavsky. L.: Shipbuilding, 1988. 80 sec.
12. Strebkov D.S. Study of the dispersion liquid of the system when the cavitation processing hydrotopes / D.S. Strebkov, Yu.A. Kozhevnikov, V.V. Serbin, Yu.M. Schekochikhin, V.G. Nikolaev // Tractors and agricultural machinery. 2013. №. 6. P. 24–27.
13. Zroychikov N.A., Lyskov M.G., Bulgakov A.B., Morozova E.A. Research and experience in the use of water-oil emulsions on power boilers TGMP-314 and tgmm-96 // Heat power Engineering. № 6. 2006. P. 31–35.
14. Devisilov V.A. Theory of combustion and explosion: a textbook for universities. M.: FORUM, 2012. 352 p.
15. Kadota T.; Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion // Progress in energy and combustion science Volume: 28 Issue: 5 P: 385–404 article Number: PII S0360-1285 (02)00005-9 Published: 2002.
16. The pat.№ 2516638 RU. Cavitator / Taymarov M.A. 20.05.2014.
17. Arinkin A.M. Hydromechanical dispersion. M.: Science, 1998. - 331 p.
18. Knorre F.G., Paleev I.I. Theory of combustion processes. M.:Energy, 1966. 476 p.
19. Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. Thermal performance testing of boiler plants. Moscow: Energy, 1977. 296 p.
20. Taymarov M.A. Calculation of parameters burn a drop of oil. Certificate of state registration of computer programs №2012614536 from may 21, 2012.

Authors of the publication

Mikhail Aleksandrovich Taymarov – Doc. Sci. (Techn.), Professor, Department Energy engineering, Kazan state power engineering university. E-mail: taimarovma@yandex.ru.

Rimma Valentinovna Akhmetova – senior lecturer, Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university. E-mail: ahmetova_rv@bk.ru.

Sergei Mikhailovich Margulis – PhD sciences (Techn), Head the Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university. E-mail: msergey1952@gmail.com.

Leysan Ilgizarovna Kasimova – PhD student, Kazan national research technological university. E-mail: k.lays@yandex.ru.

Поступила в редакцию

31 августа 2018 г.