

УДК 662.92

СЖИГАНИЕ МАЗУТА В КОТЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВКАХ ГОРЕЛОК

М.А. Таймаров, Р.В. Ахметова, В.К. Ильин, С.М. Маргулис

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

***Резюме:** В статье приведены результаты экспериментального исследования эффективности сжигания мазута в энергетических котлах ТЭС с различной компоновкой горелок при различных паровых нагрузках. Приведены значения КПД котлов и выбросов оксидов азота при сжигании мазута. Рассмотрена эффективность использования двухъярусного несимметричного встречного расположения горелок.*

***Ключевые слова:** котел, КПД, мазут, сжигание, горелка, температура факела, крутка воздуха.*

***DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-55-62*

BURNING FUEL OIL IN BOILERS WITH DIFFERENT CONFIGURATIONS OF BURNERS

M.A. Taymarov, R.V. Akhmetova, V.K. Ilin, S.M. Margulis

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

***Abstract:** The article presents the results of experimental research of efficiency of fuel oil combustion in power boilers at TPPs with different layout of burners at different steam loads. Given the values of efficiency of boilers and of emissions of nitrogen oxides when burning fuel oil. The efficiency of using bunk steel counter arrangement of burners.*

***Keywords:** boiler efficiency, fuel oil, incineration, burner, flame temperature, the coils of the air.*

Введение

Эффективность сжигания мазута в энергетических котлах зависит от ряда факторов, к числу которых относится компоновка и конструктивные особенности горелок [1; 2]. Общим является понижение температуры продуктов сгорания мазута на выходе из топки и понижение КПД котлов при переходе от сжигания газа на сжигание мазута [3; 4]. Однако путем применения оптимальных технических решений при конструировании новых горелок, модернизации существующих горелок и выбора параметров процесса сжигания мазута можно повысить КПД котлов при сжигании мазута [5]. В настоящей работе экспериментально исследуется эффективность сжигания мазута в котлах с различной компоновкой горелок. Поэтому тема статьи является актуальной.

Описание объектов исследования и условий проведения экспериментов

Эксперименты проведены на котле ПК-47 (станционный № 3) Заинской ГРЭС и на котле ПК-41 (станционный № 1) Кармановской ГРЭС при сжигании мазута М100.

Прямоточный котел ПК-47 (маркировка по ГОСТ Пп-640-140) – двухкорпусной,

производства Подольского машиностроительного завода имени Орджоникидзе (ЗИО), с температурой перегретого пара 545°C и давлением 14 МПа с промежуточным перегревом пара. Высота топки 27,55 м при одноквадратурном исполнении в поперечном сечении. Сечение топки прямоугольное размером 9,5х9,5 м при П-образной компоновке котла ПК-47.

Горелки котла ПК-47 имеют единичную мощность 48,5 МВт и являются двухпоточными вихревыми газомазутными производства ЗИО. Горелки расположены в количестве по 6 шт. на один корпус на его боковых стенах по 3 шт. в 2 яруса.

Верхний ярус на отметке 9,74 м ($h_r/h_t = 0,302$) имеет по две горелки, нижний – на отметке 7,19 м ($h_r/h_t = 0,256$) имеет по одной горелке на каждой стене.

Здесь h_r , h_t – соответственно высота расположения горелок и высота топки. Направление вращения при крутке воздуха для горелок нижнего яруса – левое с восходящим потоком у стены, для верхнего яруса – правое.

Принятая ориентация горелок увеличивает тепловые потоки на под топки. При сжигании мазута используются паромеханические форсунки. Горелки имеют нерегулируемые тангенциальные лопаточные завихрители в двух потоках воздуха.

На всех горелках используется периферийная эшелонированная в два ряда подача газа через трубы с диаметром $d_1 = 8$, $d_2 = 13$ мм. Трубы расположены на диаметре 0,69 м по периметру коаксиального канала потока воздуха от внешнего завихрителя в конфузоре перед пережимным сужением амбразуры. Пережим горелок равен 0,92.

Схема расположения горелок на котле ПК-47 (ст. № 3) Заинской ГРЭС показана на рис. 1. Задняя стена топки условно не показана, так как на ней лючков и горелок нет.

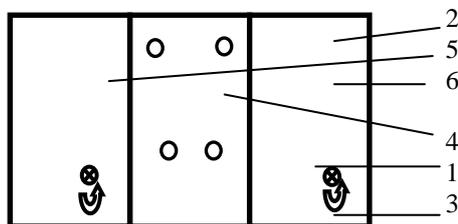


Рис. 1. Схема расположения горелок, лючков для измерений и направлений крутки воздуха в котле ПК-47: 1 – горелки; 2 – лючки; 3 – направления крутки; 4 – фронтальная стена; 5, 6 – левая и правая боковые стены топки

Число лопаток во внешнем контуре завихрителя воздуха котла ПК-47 равно 8 шт., во внутреннем – 16 шт., угол наклона лопаток равен 40° . Значение параметра крутки воздуха в горелках котла ПК-47 для внешнего потока воздуха 0,917, для внутреннего – 0,855.

Как видно из рис. 1, расположение горелок – 1 в топке котла ПК-47 выполнено несимметричным и в совокупности с направлениями круток – 3 образует при виде сверху вихревое восходящее течение продуктов сгорания с правосторонним вращением.

На Кармановской ГРЭС установлены котлы ПК-41 (маркировка по ГОСТ Пп-950-25-545ГМ) Подольского машиностроительного завода им. Орджоникидзе (ЗИО) – двухкорпусные газомазутные прямоточные.

Котлы ПК-41 – сверхкритического давления с промежуточным перегревом пара и с номинальной производительностью 950 т/ч при давлении пара 25 МПа и температуре 545°C .

Котлы ПК-41 имеют по 16 вихревых газомазутных горелок на один котел (восемь горелок на один корпус), размещенных на отметке 8,6 м. Горелки производства ЗИО, двухпоточные по воздуху, их конструкция аналогична горелкам котла ПК-47.

Компоновка горелок на котле ПК-41 – встречная однорядная на фронтальной и

задней стене топки. При сжигании мазута используются форсунки ФМ-5000 и запальник типа ЗЗУ-433У-4. Топка имеет прямоугольное сечение с размерами 17,3х8,65 м с высотой от середины пода до потолочного пароперегревателя 32,3 м.

На рис. 2 показана схема расположения горелок с направлениями крутки воздуха на котле ПК-41.

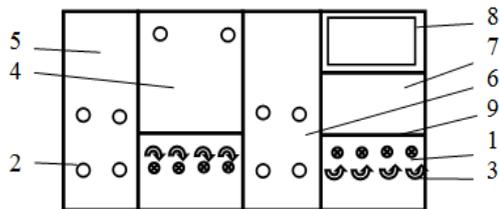


Рис. 2. Схема расположения горелок, лючков для измерений и направлений крутки воздуха в котле ПК-41: 1 – горелки; 2 – лючки, 3 – направления крутки; 4, 7 – фронтальная и задняя стены; 5, 6 – левая и правая боковые стены топки; 8 – горизонтальный газоход; 9 – пережим топки

Аэродинамические выступы в топках на рис.1 и 2 условно не показаны. Как видно из рис. 2, для котла ПК-41 вихревое по поперечному сечению топки восходящее течение не является характерным ввиду симметричного расположения горелок.

Измерение температуры факела выполнено бесконтактным способом радиометра при помощи ТЕРА-50 с градуировкой РК-15, измерение концентрации оксидов азота выполнено при помощи газоанализатора ДАГ-500. Погрешность экспериментов при измерении тепловых потоков от факела для определения температуры составила $\pm 2,76\%$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 1 приведены экспериментальные данные по работе прямоточного котла ПК-47 (Пп-640-140) при различных паровых нагрузках во время опытов.

Таблица 1

Показатели работы прямоточного котла ПК-47 (ст. №3) Заинской ГРЭС при сжигании мазута М100 с теплотой сгорания 35368 кДж/кг

Паровая нагрузка одного корпуса, т/ч	315	255	220
Давление острого пара за котлом, МПа	13,6	13,5	13,3
Температура острого пара за котлом, °С	545	545	545
Температура питательной воды, °С	242	231	225
Температура воздуха перед регенеративным воздухоподогревателем, °С	70	70	70
Температура пара на входе промежуточного пароперегревателя, °С	353	330	316
Давление пара промежуточного перегрева, МПа	2,32	1,97	1,71
Температура продуктов сгорания в поворотной камере, °С	800	770	755
Давление мазута перед форсунками, МПа	1,9	1,7	1,5
Давление пара перед форсунками, МПа	0,9	0,9	0,9
Расход мазута, т/ч	25,8	23,2	18
Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении α	1,048	1,058	1,106
Концентрация NO_x в режимном сечении, мг/м ³ (в пересчете на коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,4$)	342	300	240
Температура факела на уровне горелок, °С	1320	1270	1220
Содержание кислорода в дымовых газах режимного сечения, %	1	1,2	2,1
Температура уходящих газов, °С	154	151	149
Потери теплоты с уходящими газами, %	7,5	7,26	7,05
КПД котла брутто, %	92,05	92,19	92,3

Как видно из табл. 1, с ростом паровой нагрузки на 43,2% выбросы оксидов азота увеличиваются на 42,5%, что объясняется повышением температуры факела на уровне горелок второго яруса. С ростом паровой нагрузки КПД котла снижается, что связано с увеличением температуры уходящих газов.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов работе котла ПК-41 (ст. №1) Кармановской ГРЭС при сжигании мазута М100.

Таблица 2

Показатели работы прямоточного котла ПК-41 (ст. №1) Кармановской ГРЭС при сжигании мазута М100 с теплотой сгорания 37291 кДж/кг в сравнении с данными [6]

Паровая нагрузка одного корпуса, т /ч	488	398	260	413[6]
Давление острого пара за котлом, МПа	24	22,3	16,5	13,5
Температура острого пара за котлом, °С	545	545	545	555
Температура питательной воды, °С	248	237	226	231
Температура воздуха перед регенеративным воздухоподогревателем, °С	70	70	70	70
Температура воздуха перед горелками, °С	326	326	326	214
Температура мазута, °С	135	135	135	95
Давление мазута перед форсунками, МПа	3,5	3,5	3,5	2,5
Расход мазута, т/ч	32,9	26,2	18	28,6
Концентрация NO _x в режимном сечении, мг/м ³ (в пересчете на коэффициент избытка воздуха α=1,4)	490	435	425	413
Температура факела на уровне горелок, °С	1390	1310	1260	1290
Температура уходящих газов, °С	165	159	154	162
Содержание кислорода в дымовых газах режимного сечения, %	2,1	2,5	2,9	1,9
КПД котла brutto, %	90,20	90,57	91,21	92,55

Как видно из табл. 2, значения КПД для котла ПК-41, по сравнению с котлом ПК-47, заметно ниже, что обусловлено повышенными температурами уходящих газов.

Выбросы оксидов азота для котла ПК-41 существенно выше значений, полученных для котла ПК-47. Это связано с тем, что в котле ПК-47 (см. рис. 1) за счет смещения горелок первого яруса относительно горелок второго яруса организуется вращательно-восходящая по высоте топке крутка факела. Время пребывания продуктов горения в топке котла ПК-47 в зоне высоких температур снижается за счет увеличения скорости движения факела. За счет этого образуется меньше термических оксидов азота.

В топке котла ПК-41 (см. рис. 2) вращательно-восходящая по высоте крутка факела отсутствует, так как расположение горелок встречное однорядное. Факел восходящий и время пребывания продуктов горения в зоне высоких температур увеличивается, что приводит к росту генерации оксидов азота.

Интенсификация процессов смешения топлива и воздуха при двухъярусном расположении горелок и вращательно-восходящей суммарной крутке факела позволяет избежать повышения температуры продуктов сгорания на выходе из топки и снизить потери тепла с уходящими газами.

Надежность воспламенения топлива при двухъярусном расположении горелок обеспечивается выбором направления круток воздуха по горелкам первого нижнего и второго верхнего яруса с наклоном осей горелок как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

Устойчивость горения при двухъярусном расположении горелок и организации вращательно-восходящей суммарной крутки факела в топке позволяет получать эффект взаимодействия от факелов отдельных горелок с сокращением их высоко температурных зон кинетического и диффузионного горения, которые являются основными

источниками эмиссии термических оксидов азота.

В табл. 2 приведено сравнение полученных в настоящей работе результатов с данными для котла ТГМ-84А [6], который имеет 4 вихревые горелки типа ХФ ЦБК-ВТИ-ТКЗ, расположенные на фронтальной стене в 2 яруса.

Как видно из сравнения значений КПД (см. табл. 2), двухъярусное расположение горелок в котле ТГМ-84А [6], по сравнению с одноярусным в котле ПК-41, дает более высокие значения КПД при пониженных выбросах оксидов азота.

Зависимость содержания кислорода O_2 в продуктах сгорания в режимном сечении и температуры уходящих газов t_{yx} от паровой нагрузки D для котлов ПК-47 и ПК-41 при сжигании мазута М100 приведена на рис. 3.

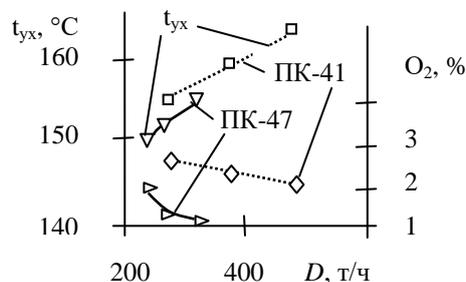


Рис. 3. Зависимость содержания кислорода O_2 (% объемн.) в продуктах сгорания в режимном сечении и температуры уходящих газов t_{yx} от паровой нагрузки D для котлов ПК-47 и ПК-41 при сжигании мазута М100

Как видно из рис. 3, при одноярусном встречном расположении горелок в котле ПК-41 в составе продуктов сгорания достаточно большое количество избыточного кислорода O_2 , которое в среднем в 2 раза выше по сравнению с котлом ПК-47, имеющим двухъярусное расположение горелок. Общей тенденцией для котлов является повышение балластного воздуха, а следовательно и кислорода O_2 , подаваемого в горелки, при снижении паровой нагрузки D .

На рис. 4 показаны зависимости коэффициента избытка воздуха α и содержания оксида азота NO_x в режимном сечении (mg/m^3) от паровой нагрузки D для котлов ПК-47 и ПК-41 при сжигании мазута М100.

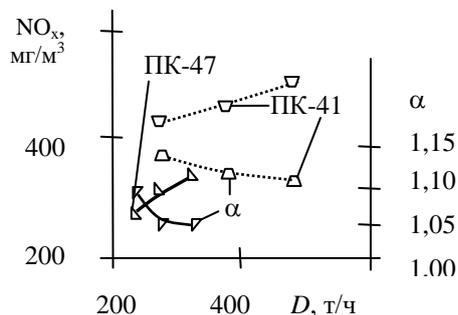


Рис. 4. Зависимости коэффициента избытка воздуха α и содержания оксида азота NO_x в режимном сечении (mg/m^3) от паровой нагрузки D для котлов ПК-47 и ПК-41 при сжигании мазута М100

На рис. 4 содержание оксида азота NO_x в режимном сечении от паровой нагрузки D приведено в пересчете на коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$. Как видно из рис.4, с

ростом паровой нагрузки D увеличение концентрации оксида азота NO_x в продуктах сгорания проявляется очень заметно и связано с ростом температуры продуктов сгорания в зоне горения. Однако для котла ПК-47 при двухъярусном расположении горелок и смещенном асимметричном расположении нижнего яруса образуется вращательно-восходящий вихревой поток с повышенной скоростью движения в нем продуктов сгорания. Основная доля тепла в факеле передается за счет излучения. Время пребывания продуктов горения в высокотемпературной зоне уменьшается. Это дает положительный эффект снижения генерации оксидов азота.

Сравнительные значения КПД брутто η и температуры факела на уровне горелок $t_{\text{ф}}$ для котлов ПК-47 и ПК-41 при различных паровых нагрузках D для сжигания мазута М100 приведены на рис. 5.

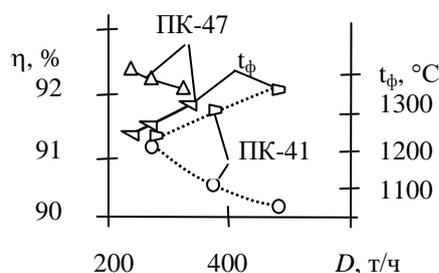


Рис. 5. Сравнительные значения КПД брутто η (%) и температуры факела на уровне горелок $t_{\text{ф}}$ (°C) для котлов ПК-47 и ПК-41 при различных паровых нагрузках D (т/ч) для сжигания мазута М100

Как видно из рис. 5, КПД η котлов ПК-47 и ПК-41 при росте паровой нагрузки D снижается, что связано с увеличением температуры уходящих газов. Однако для котла ПК-41 с одноярусным встречным расположением горелок зависимость снижения КПД η при наборе нагрузки проявляется гораздо заметнее по сравнению с котлом ПК-47. Так в среднем увеличение паровой нагрузки котла ПК-41 на 100 т/ч сопровождается снижением его КПД на 0,4%, а для котла ПК-47 снижение КПД составляет около 0,26%. Температура факела $t_{\text{ф}}$ для котла ПК-41 в области малых паровых нагрузок D 260...400 т/ч несколько ниже по сравнению с котлом ПК-47, что связано с большими коэффициентами избытка воздуха.

Выводы

1. Применение двухъярусного несимметричного встречного расположения горелок, по сравнению с одноярусным встречным, в котлах при сжигании мазута позволяет получить более высокие значения КПД и снизить вредные выбросы оксидов азота в атмосферу.
2. Несимметричная двухъярусная встречная компоновка горелок в топке с применением периферийной тангенциальной круткой воздуха, по сравнению с одноярусной встречной, позволяет получать восходящее вихреобразное течение продуктов сгорания, которое способствует повышению эффективности сжигания топлива.

Литература

1. Таймаров М.А., Лавирко Ю.В., Беляева Е.А. Интенсивность лучистого теплообмена в топке котла при изменении паровой нагрузки // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 1–4.
2. Трембовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 297 с.

3. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сафин Р.Г., Лавирко Ю.В., Садыков Р.А., Медведева Г.А. Определение зависимости времени выгорания капли мазута от интенсивности излучения пламени. Research Journal of Applied Sciences Year: 2016. Vol. 11. Iss. 12. P. 1660–1665.
4. Zhang Ji, Yuan Han, Zhao Jian, Mei Ning. Viscosity estimation and component identification for an oil-water emulsion with the inversion method. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 111, pp. 759–767. Available: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.153
5. Абрютин А.А., Вязовой С.К. Исследование теплообмена в топке и ширмовом пароперегревателе при сжигании мазута и газа с малыми избытками воздуха // Теплоэнергетика. 1971. № 12. С.16–19.
6. Gelderen L., Malmquist L.M.V.; Jomaas G. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. 2017. P. 558–537.
7. Kadota T., Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. - Progress in energy and combustion science. 2002, № 5. Том 28. С. 385–404.
8. Ahrenfeldt J., Thomsen T.P., Henriksen U., Clausen L.R. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives // Applied Thermal Engineering. 2013. № 50. P. 1407–1417.
9. Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., Чикляев Д.Е. Исследование химических процессов образования оксидов азота при сжигании газа и мазута // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19, № 20. С. 80–83.
10. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. Л.: Энергия, 1973. 263 с.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) 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.

Ильин Владимир Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: ilinwk@rambler.ru.

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

References

1. Taymarov M.A., Lavirko Yu.V., Belyayeva E.A. The intensity of radiant heat exchange in the furnace of the boiler when the steam load changes // Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2015. № 7–8. P.P.1–4.
2. Trembovlya V.I. Heat-process engineering tests of boiler plants. M.: Energy, 1977. 297 p.
3. Taymarov M.A., Akhmetova R.V., Safin R.G., Lavirko Yu.V., Sadykov R.A., Medvedeva G.A. Calculation of Fuel Oil Drop Burnup Time Dependence on Intensity of Flame Radiation. Research Journal of Applied Sciences, 11: 1660–1665. DOI: 10.3923/rjasci.2016.1660.1665
4. Zhang, Ji, Yuan, Han, Zhao, Jian, Mei, Ning Viscosity estimation and component identification for an oil-water emulsion with the inversion method. Journal of Petroleum Science and Engineering, vol 111, p. 759-767.
5. Abrutyn A.A., Vyazovoy S.K. Investigation of heat transfer in the furnace and screen reheater

when burning fuel oil and gas with low excess air // Heat power engineering. 1971. №12. P.P.16–19.

6. Gelderen L., Malmquist L.M.V., Jomaas G. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. 2017. P. 558–537.

7. Kadota T., Yamasaki H. Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. - Progress in energy and combustion science. 2002. №5. Vol. 28. P. 385–404.

8. Ahrenfeldt J., Thomsen T. P., Henriksen U., Clausen L.R. Biomass gasification cogeneration. - A review of state of the art technology and near future perspectives // Thermal Engineering. 2013. №50. P.P. 1407–1417.

9. Taymarov M.A., Kuvshinov N.E., Akhmetova R.V., Sungatullin R.G., Chiklyayev D.E. Investigation of chemical processes of education of nitrogen oxides in combustion of gas and oil // Bulletin of Kazan Technological University. 2016. Vol. 19, №. 20. P.P. 80–83.

10. Pomerancev V.V. Fundamentals of the practical theory of combustion. L.: Energiya, 1973. 263 p.

Authors of the publication

Taymarov Mikhail Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor, Department Energy engineering, Kazan state power engineering university.

Akhmetova Rimma Valentinovna – senior lecturer, Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university.

Il'in Vladimir Kuz'mich – doctor of technical sciences, professor, Department Power supply of enterprises and energy resource saving technologies Kazan state power engineering university.

Margulis Sergei Mikhailovich – candidate of technical sciences, assistant professor, Department of Electric Stations, Kazan state power engineering university.

Поступила в редакцию

10 апреля 2018 г.