Статья поступила в редакцию 31.08.15. Ред. рег. № 2350 The article has entered in publishing office 31.08.15. Ed. reg. No. 2350

УДК 621.311.22 doi: 10.15518/isjaee.2015.17-18.024

ОБРАЗОВАНИЕ БЕНЗ(А)ПИРЕНА ПРИ ГОРЕНИИ МАЗУТА В ТОПКЕ КОТЛА

М.С. Иваницкий

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69
Тел.: (8443) 210160, факс: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru

Заключение совета рецензентов: 03.09.15 Заключение совета экспертов: 06.09.15 Принято к публикации: 09.09.15

Приведен анализ параметров, влияющих на интенсивность образования бенз(а)пирена при сжигании органического топлива в энергетических установках. Установлена функциональная зависимость влияния низшей теплоты сгорания мазута на условия генерации бенз(а)пирена в топочной камере котла.

Предложена методика расчета содержания бенз(а)пирена в уходящих газах с учетом влияния теплоты, вносимой в зону активного горения с топливом, воздухом, газами рециркуляции и влагой (водой или паром), характеризующая механизм и интенсивность процесса сжигания мазута.

Теплота сгорания топлива определяет механизм протекания процесса генерации бенз(а)пирена. Наличие тяжелых углеводородов способствует большему выходу канцерогенов и худшим условиям экологичности топочного процесса. Поэтому для значимого сокращения эмиссии бенз(а)пирена при сжигании мазута необходимо проводить исследования выгорания низкосортного и малореакционного топлива, особенно при использовании высокосернистых мазутов и мазутов с большим содержанием тяжелых углеводородов.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, мазут, уходящие газы, токсичность.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

THE FORMATION OF BENZ(A)PYRENE IN THE COMBUSTION OF FUEL OIL IN THE BOILER FURNACE

M.S. Ivanitskii

Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia
Tel.: (8443) 210160, fax: (8443) 210166, e-mail: vfmei@vfmei.ru
Referred: 03.09.15 Expertise: 06.09.15 Accepted: 09.09.15

The analysis of the parameters influencing the rate of formation of benz(a)pyrene combustion of fossil fuels in power plants. Established the functional dependence of the influence of net calorific value of fuel oil at the conditions of generation of benz(a)pyrene in the combustion chamber of the boiler.

The methods of calculating the benz(a)pyrene content in the flue gases taking into account the influence of heat applied to the active combustion zone with the fuel, air, gas recirculation and moisture (water or steam) characterizing the mechanism and intensity of the combustion process of fuel oil.

The heat of combustion of the fuel determines the mechanism of the process of generation of benz(a)pyrene. The presence of heavy hydrocarbons contributes to greater release of carcinogens and worst environmental conditions of the combustion process. Therefore, for meaningful emissions reductions benz(a)pyrene combustion of heavy fuel oil needed to conduct research on burnout and low-grade alloreactive fuel, especially when using high sulfur content of fuel oils and fuel oils with high content of heavy hydrocarbons.

Keywords: benz(a)pyrene, oil, fumes, toxicity.

Максим Сергеевич Иваницкий
Maxim S. Ivanitskii

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» ВФ МЭИ.
Образование: ВФ МЭИ (2011).
Область научных интересов: процессы горения топлива, экология энергетики.
Публикации: 47.

Author information: Ph.D., associate professor of department “Heat and Heat Engineering”.
Education: Volzhsky Branch of Moscow Power Engineering Institute (2011).
Research interests: fuel combustion processes, ecology of energy.
Publications: 47.

International Publishing House for scientific periodicals “Space”
Международный издательский дом научной периодики “Спейс”

Введение

Теплотворная способность углеводородного топлива характеризует уровень среднеинтегральной температуры в зоне активного горения (ЗАГ) топки котла. Температура в ЗАГ влияет на интенсивность и механизм образования полиароматических углеводородов (ПАУ) в продуктах сгорания. Бенз(а)пирен (БП) является ярким представителем ПАУ и канцерогенным веществом, в значительном количестве генерируется при горении мазута. На интенсивность образования БП дополнительно влияет степень метаморфизма мазута. В отечественной теплоэнергетике для получения тепла и электроэнергии применяют два основных типа мазута – М40 и М100, отличающихся между собой условной вязкостью и некоторыми другими рабочими характеристиками. Основные механизмы образования БП и способы определения его содержания в уходящих газах при горении органического топлива рассмотрены в работах и документах [1-14].

Тенденции по сокращению образования канцерогенных полиароматических соединений должны быть направлены в первую очередь для разработки и оптимизации топочных режимов работы котельных установок. Повышение интенсивности смесеобразования и выгорания топлива способствует снижению выхода всей группы ПАУ, и в частности, БП. Наладка режимов работы котла на максимальную экологичность выбросов возможна лишь при наличии доступных методов определения концентрации БП в дымовых газах. Так, наряду с концентрацией монооксида углерода содержание БП в продуктах сгорания является показателем, характеризующим неполноту сгорания углеводородного топлива. При горении мазута также следует большее внимание уделять процессу сажеобразования вследствие генерации БП на одной из стадий роста сажистых частиц.

Численное исследование

Концентрация БП (мкг/м^3) в сухих дымовых газах котлов при сжигании мазута, приведенная к избытку воздуха в уходящих газах, равному 1,4, рассчитывается в соответствии со стандартом отрасли, разработанным ОАО «ВТИ» по формуле [14]

$$C^{\text{М}}_{\text{Б(а)П}} = \frac{q_{\text{лг}}^{-0,53}\left(0,232 + 0,606\cdot 10^{-3} q_{\text{v}}\right)}{e^{-25(\alpha-1)}} \prod_{i=1}^{N} K_i \,, \quad (1)$$

где $q_{\text{лг}}$ – теплонапряжение поверхности зоны активного горения, МВт/м^2; q_v – объемное теплонапряжение топочного объема, кВт/м^3; α – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из топки; $\prod_{i=1}^{N} K_i = K_{\text{Р}} K_{\text{Д}} K_{\text{СТ}} K_{\text{ВЛ}} K_{\text{ОЧ}}$ – произведение коэффициентов для учета влияния рециркуляции, нагрузки котла, ступенчатого сжигания топлива, подачи влаги и очистки поверхностей нагрева.

Поверхностное теплонапряжение в зоне активного горения рассчитывается по выражению

$$q_{\text{лг}} = BQ^{\text{р}}_{\text{н}} / F_{\text{ЗАГ}} \,, \quad (2)$$

где B – расход топлива на котел, кг/с; $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$ – теплота сгорания топлива, МДж/кг; $F_{\text{ЗАГ}}$ – площадь поверхности зоны активного горения, м^2.

Анализ (1) показывает, что теплота сгорания топлива прямо пропорционально влияет на образование БП. Следует отметить, что при повышении температуры в зоне активного горения интенсивность генерации БП должна снижаться вследствие более полного выгорания топлива. При температуре в ЗАГ выше 850 °С БП образуется незначительно, лишь в некоторых случаях при нарушении топочного режима, связанного с недостатком кислорода, в отдельных областях топочной камеры генерируется значительное количество этого вещества.

В (1) не учитывается теплота, вносимая в зону горения с топливом, воздухом, газами рециркуляции и влагой. Поэтому значение эксплуатационной теплоты, вносимой в топочную камеру, предлагается рассчитывать по формуле

$$Q^r_{\text{ЭКСП}} = \beta_{\text{СГ}} Q^r_i + Q_{\text{ТЛ}} + Q_{\text{В}} + Q_{\text{ГР}} + Q_{\text{ВЛ}}, \qquad (3)$$

где $\beta_{\text{СГ}}$ – степень выгорания топлива, зависящая от коэффициента избытка воздуха α в зоне активного горения; Q^r_i – теплота сгорания топлива, МДж/кг; $Q_{\text{ТЛ}}$ – теплота, вносимая в зону активного горения с топливом (при наличии предварительного подогрева), МДж/кг; $Q_{\text{В}}$ – теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/кг; $Q_{\text{ГР}}$ – теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/кг; $Q_{\text{ВЛ}}$ – теплота, вносимая в зону активного горения с влагой (водой или паром), МДж/кг.

В (3) степень выгорания топлива $\beta_{\text{СГ}}$ зависит от величины химического и механического недожога и определяется по уравнению

$$\beta_{\text{СГ}} = 1 - q_3 - q_4. \qquad (4)$$

Химический недожог q_3 можно выразить через удельное содержание монооксида углерода CO в продуктах сгорания следующей зависимостью:

$$q_3 = \frac{1{,}013\text{CO}}{RQ^r_{\text{ЭКСП}}}, \qquad (5)$$

где R – коэффициент, зависящий от вида сжигаемого топлива и типа горелочного устройства; при сжигании мазута $R = 0{,}65$.

Удельный выход CO с дымовыми газами определим по выражению

$$\text{CO} = C_{\text{CO}}\left[V^0_{\text{Г}} + 1{,}0161(\alpha - 1)V^0_{\text{В}}\right]\frac{t_{\text{ух}} + 273}{273}, \qquad (6)$$

где C_{CO} – содержание монооксида углерода в продуктах сгорания, мг/м^3; $V^0_{\text{Г}}$, $V^0_{\text{В}}$ – теоретический объем дымовых газов и воздуха при сжигании 1 кг топлива, м^3/кг; $t_{\text{ух}}$ – температура уходящих газов, °C.

При этом концентрацию монооксида углерода (%) в продуктах сгорания можно вычислить по количеству кислорода, содержанию трехатомных газов и характеристике твердого топлива β и выразить следующей известной зависимостью:

$$C_{\text{CO}} = \frac{21 - \text{O}_2 - (1+\beta)R\text{O}_2}{0{,}605 + \beta}, \qquad (7)$$

где $R\text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ – содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива, %; O_2 – концентрация кислорода в дымовых газах, %.

При $C_{\text{CO}} = 0$, $\text{O}_2 = 0$ с учетом (7) получим выражение для определения максимального выхода трехатомных газов:

$$R\text{O}_2 = \frac{21}{1+\beta}. \qquad (8)$$

При использовании экспериментальных данных по величине трехатомных газов возможно определить характеристику топлива:

$$\beta = 1 - \frac{21}{R\text{O}_2}. \qquad (9)$$

Характеристика мазута β зависит от его химического состава при рабочих параметрах и определяется известным выражением

$$\beta = 2{,}35\frac{\text{H}^{\text{P}} - 0{,}126\text{O}^{\text{P}} + 0{,}038\text{N}^{\text{P}}}{\text{C}^{\text{P}} + 0{,}375S^{\text{P}}_{\text{ОР+К}}}, \qquad (10)$$

здесь H^{P}, O^{P}, N^{P}, C^{P}, $S^{\text{P}}_{\text{ОР+К}}$ – содержание водорода, кислорода, азота, углерода и серы (органической и колчеданной) в топливе при рабочих условиях.

Характеристики мазутных топлив β в зависимости от химического состава мазута на рабочую массу представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики мазутных топлив

Table 1

Characteristics of residual fuels

Параметр	Месторождение		
	Усинское	Гремихинское	Мишинское
β	0,11	0,04	0,07

Учет исходного химического состава топлива позволит более полно оценивать содержание БП в уходящих дымовых газах газомазутных котельных установок. Следует отметить, что образование трехатомных газов в топочной камере приводит к повышению содержания монооксида углерода в продуктах сгорания, а также созданию благоприятных условий для интенсивной генерации БП. Большие значения β способствуют повышенному образованию БП в топке.

Для корректного определения содержания БП в уходящих газах при горении мазута необходимо учитывать воздействие систем очистки поверхностей нагрева котла. Степень и интенсивность очистки конвективных поверхностей нагрева энергоустановки от сажистых частиц в значительной доле определяется типом применяемой технологии. Значения коэффициента очистки, учитывающего увеличение выброса БП при обработке поверхностей нагрева в рабочем состоянии, приведены в табл. 2.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Таблица 2

Значения коэффициента очистки, учитывающего увеличение выброса бенз(а)пирена при очистке поверхностей нагрева в рабочем состоянии [14]

Table 2

Values of the coefficient of purification that takes into account the increase in the emissions of benz(a)pyrene when cleaning the heating surfaces in working condition [14]

Период между очистками, ч	Коэффициент $K_{ОЧ}$	
	при дробевой очистке конвективных поверхностей нагрева	при обдувках регенеративных воздухоподогревателей
12-24	1,2	1,1
40-48	1,5	1,25
72	2,0	1,5

Повышенное содержание БП в продуктах сгорания в процессе очистки конвективных поверхностей нагрева при сжигании жидкого топлива объясняется абсорбированием его паров на взвешенных частицах удаляемых отложений. В свою очередь, необходимо отметить, что эффективность работы действующих систем очистки низкая. Поэтому коэффициент очистки лишь качественно характеризует удаление сажистых частиц и отложений с поверхностей нагрева и при этом позволяет оценивать расчетные значения концентраций БП в продуктах сгорания. В зависимости от длительности межочистного периода и типа системы значения коэффициента очистки изменяются в пределах 1,1-2,0. В значительной степени эффективность удаления сажистых частиц с поверхностей нагрева указывает на необходимость учета вторичного выноса или загрязнения окружающей среды коксосажистыми частицами, на которых абсорбированы микропримеси БП. Отдельным важным моментом является необходимость учета вторичного выноса сажистых частиц и БП при расчете аварийных (предельных) выбросов вредных веществ в воздушный бассейн, особенно в районах плотной городской застройки или при проектировании и строительстве новых тепловых электростанций.

Выводы

Предложена методика расчета содержания БП в уходящих газах с учетом влияния теплоты, вносимой в зону активного горения с топливом, воздухом, газами рециркуляции и влагой (водой или паром), характеризующая механизм и интенсивность процесса сжигания мазута.

Установлена зависимость концентрации БП от содержания монооксида углерода и характеристики топлива β в продуктах сгорания при горении мазута.

Для значимого сокращения эмиссии БП при сжигании мазута необходимо проводить исследования выгорания низкосортного и малореакционного топлива, особенно при использовании высокосернистных мазутов и мазутов с большим содержанием тяжелых углеводородов.

Теплота сгорания топлива косвенным образом определяет механизм протекания процесса генерации БП. Наличие тяжелых углеводородов способствует большему выходу канцерогенов и худшим условиям экологичности топочного процесса и состояния окружающей среды.

Список литературы

1. Ахмедов Р.Б., Цирульников Л.М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. Л.: Недра, 1984.

2. Беджер Г.М. Химические основы канцерогенной активности. М.: Медицина, 1966.

3. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / под ред. Н.В. Лаврова. М.: Металлургия, 1981.

4. Лавров Н.В., Стасевич Н.Л., Комина Г.М. О механизме образования бенз(а)пирена // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206, № 6. С. 1363-1366.

5. Матвеев С.Г., Чечет И.В. Обоснование модели синтеза ПАУ на основе карбенного механизма пиролиза ацетилена // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: Докл. междунар. научн.-техн. конференции. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1997. Т. 2. С. 218-224.

References

1. Ahmedov R.B., Cirul'nikov L.M. Tehnologiâ sžiganiâ gorûčih gazov i židkih topliv. L.: Nedra, 1984.

2. Bedžer G.M. Himičeskie osnovy kancerogennoj aktivnosti. M.: Medicina, 1966.

3. Lavrov N.V., Rozenfel'd È.I., Haustovič G.P. Processy goreniâ topliva i zaŝita okružaûŝej sredy / pod red. N.V. Lavrova. M.: Metallurgiâ, 1981.

4. Lavrov N.V., Stasevič N.L., Komina G.M. O mehanizme obrazovaniâ benz(a)pirena // Dokl. AN SSSR. 1972. T. 206, № 6. S. 1363-1366.

5. Matveev S.G., Čečet I.V. Obosnovanie modeli sinteza PAU na osnove karbennogo mehanizma piroliza acetilena // Problemy i perspektivy razvitiâ dvigatelestroeniâ v Povolžskom regione: Dokl. meždunar. naučn.-tehn. konferencii. Samar. gos. aèrokosm. un-t. Samara, 1997. T. 2. S. 218-224.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

6. Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Урывский А.Ф. О моделировании процесса образования бенз(а)пирена на основе глобальных реакций // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. 1996. № 1. С. 62-64.

7. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50, № 1-3. P. 79-115.

8. Росляков П.В. Методы защиты окружающей среды: Учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.

9. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Фокин В.М., Грига С.А. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива // Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 27(46). С. 28-33.

10. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Грига С.А., Фокин В.М. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 28(47). С. 143-150.

11. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Определение концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок и способ автоматического регулирования процесса горения // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3(83). С. 52-56.

12. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEE. 2013. № 14(136). С. 67-70.

13. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в уходящих газах камеры сгорания газовой турбины // Вестник ВГТУ. Серия «Энергетика». 2014. № 10. Т. 5. С. 86-88.

14. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. Введ. 01.07.03. Москва, 2003.

6. Lukačev S.V., Matveev S.G., Uryvskij A.F. O modelirovanii processa obrazovaniâ benz(a)pirena na osnove global'nyh reakcij // Izv. vuzov. Ser. Aviacionnaâ tehnika. 1996. № 1. S. 62-64.

7. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50, № 1-3. P. 79-115.

8. Roslâkov P.V. Metody zaŝity okružaûŝej sredy: Učebnik dlâ vuzov. M.: Izd. dom MÈI, 2007.

9. Ivanickij M.S., Griga A.D., Fokin V.M., Griga S.A. Fiziko-himičeskie processy mehanizmov obrazovaniâ benz(a)pirena pri sžiganii uglevodorodnogo topliva // Vestnik VolgGASU. 2012. № 27(46). S. 28-33.

10. Ivanickij M.S., Griga A.D., Griga S.A., Fokin V.M. Postroenie modeli dlâ opredeleniâ koncentracii benz(a)pirena pri sžiganii uglevodorodnogo topliva v kotel'nyh ustanovkah sistem teplosnabženiâ // Vestnik VolgGASU. 2012. № 28(47). S. 143-150.

11. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie koncentracii benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh ustanovok i sposob avtomatičeskogo regulirovaniâ processa goreniâ // Ènergosbereženie i vodopodgotovka. 2013. № 3(83). S. 52-56.

12. Griga A.D., Ivanickij M.S. Opredelenie soderžaniâ benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh ustanovok maloj moŝnosti // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEE. 2013. № 14(136). S. 67-70.

13. Griga A.D., Ivanickij M.S. Opredelenie soderžaniâ benz(a)pirena v uhodâŝih gazah kamery sgoraniâ gazovoj turbiny // Vestnik VGTU. Seriâ «Ènergetika». 2014. № 10. T. 5. S. 86-88.

14. RD 153-34. 1-02. 316-2003. Metodika rasčeta vybrosov benz(a)pirena v atmosferu parovymi kotlami èlektrostancij. Vved. 01.07.03. Moskva, 2003.

Транслитерация по ISO 9:1995

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"