

## ОСОБЕННОСТИ РАССЕИВАНИЯ ВЫБРОСОВ БЕНЗ(А)ПИРЕНА ОТ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ

М.С. ИВАНИЦКИЙ

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском

*В статье рассматриваются вопросы рассеивания выбросов бенз(а)пирена в воздухе атмосферы и канцерогенного влияния его на экологическую безопасность окружающей среды городской застройки. Отмечено значительное влияние полициклических ароматических углеводородов на формирование общего уровня токсичности газообразных выбросов котлов. Показана целесообразность учета выбросов бенз(а)пирена и пентаоксида ванадия в расчетах, связанных с оценкой и оптимизацией размеров санитарно-защитной зоны отопительной котельной. Определены максимальные приземные концентрации бенз(а)пирена при рассеивании в условиях городской среды. Предложены упрощенные математические зависимости и проведен расчет коэффициентов турбулентной диффузии в результате распространения выбросов бенз(а)пирена, содержащегося в продуктах сгорания природного газа и мазута.*

*Ключевые слова: продукты горения, рассеивание, выбросы бенз(а)пирена.*

### Введение

В процессе сжигания топлива в теплогенерирующих установках и отопительных котельных в воздушный бассейн выбрасываются вещества, обладающие токсичным действием: зола, сажа, оксиды азота, серы и углерода, бенз(а)пирен (БП), пентаоксид ванадия ( $V_2O_5$ ), бензол ( $C_6H_6$ ), формальдегид. Горение топлива с малыми избытками воздуха, высоким содержанием тяжелых углеводородов и низким уровнем температур (менее  $850\text{ }^\circ\text{C}$ ) провоцирует генерацию в продуктах сгорания канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в том числе БП. Установлено, что значимая часть образовавшегося БП абсорбируется на поверхности сажистых частиц [1–3, 6–10].

Влияние котлов теплоснабжения на загрязнение воздушного бассейна БП в значительной степени характеризуется вкладом паровых пылеугольных энергоустановок и водогрейных котлов тепловой мощностью менее 25 МВт. Данные экспериментальных исследований по содержанию БП в продуктах сгорания для котлов малой мощности немногочисленны, что связано со сложностью при отборе проб и отсутствием доступных измерительных систем и методов (хроматография, спектрофотометрия) [1]. В дымовых газах отопительных котлов кроме БП образуются и другие ПАУ (бенз(b)флуорантен, дибенз(a,h)антрацен, 2,3-фениленирен, пирен, хризен и т.д.), которые обладают сильным биологическим воздействием [2, 6].

Выбросы БП и пентаоксида ванадия способствуют нарушению экологической безопасности городской территории и объектов теплоснабжения. Обоснование санитарно-защитной зоны расположения котельной в условиях плотной городской застройки можно проводить на основе численного моделирования процессов рассеивания вредных компонентов сгорания [5].

### Численное исследование и моделирование

Объектами исследования являются: водогрейный газомазутный котел КВГМ-20, тепловой мощностью 20 МВт, с паромеханическими форсунками и газовый водогрейный котел *ICI REX 75* с реверсивным развитием факела, выпуклым днищем и трубной решеткой, мощностью 750 кВт, с наддувным горелочным устройством *Siemens LGB 21.330A2EM*, эксплуатируемые в системе теплоснабжения г. Волжский.

Основные рабочие характеристики природного газа и сернистого мазута представлены в табл. 1. В качестве варьируемых режимных параметров котла КВГМ-20 используется коэффициент избытка воздуха в диапазоне 1,15÷1,25, для котла *ICI REX 75* коэффициент избытка воздуха изменяется в пределах 1,05÷1,15. Нагрузка котлов варьируется в пределах 70÷100 %. Расход топлива в номинальном режиме работы котлов: природного газа –  $B = 0,024 \text{ м}^3/\text{с}$ , мазута –  $B = 0,503 \text{ кг/с}$ . Рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание топлива и подача влаги в топочную камеру не производится. Теплонапряжение объема топочной камеры  $q_V = 432,6 \text{ кВт/м}^3$ , принято согласно паспортным данным котла КВГМ-20, для теплогенератора *ICI REX 75*  $q_V = 333,2 \text{ кВт/м}^3$ . Объемный расход дымовых газов при изменении коэффициента избытка воздуха в заданном диапазоне нагрузок котла КВГМ-20 варьировался в пределах 7,22÷11,16  $\text{м}^3/\text{с}$ , для теплогенератора *ICI REX 75* изменялся в диапазоне 0,314÷0,527  $\text{м}^3/\text{с}$ . Температура продуктов сгорания в условиях номинальной нагрузки котла *ICI REX 75* составляла 159 °С, для КВГМ-20 принималась равной 162 °С. Высота дымовой трубы котла *ICI REX 75* равна 15 м, диаметр устья дымовой трубы 0,6 м; для теплогенератора КВГМ-20 высота трубы равна 30 м, диаметр устья трубы 1 м.

Таблица 1

Рабочие характеристики природного газа и мазута

Компонентный состав природного газа, % ( $Q_H^P = 33,5 \text{ МДж/м}^3$ )						
CH <sub>4</sub> =94,0	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> =1,0	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =1,5	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> =0,7	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> =0,6	H <sub>2</sub> =2,0	CO <sub>2</sub> =0,2
Компонентный состав сернистого мазута, % ( $Q_H^P = 39,73 \text{ МДж/кг}$ )						
W=3,0	A=0,1	S=1,4	C=83,8	H=11,2	O=0,4	N=0,1

Концентрация БП,  $\text{мг/м}^3$ , в сухих дымовых газах водогрейных котлов при сжигании природного газа  $C_{\text{БП}}^{\Gamma}$ , в зависимости от диапазона значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,05 \div 1,25$  и объемного теплонапряжения топочной камеры в пределах  $q_V = 250 \div 500 \text{ кВт/м}^3$ , рассчитывается по формуле

$$C_{\text{БП}}^{\Gamma} = \frac{10^{-6} \cdot (0,11q_V - 7,0)}{e^{3,5(\alpha-1)}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i, \quad (1)$$

где  $q_V$  – теплонапряжение топочного объема,  $\text{кВт/м}^3$ ;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах на выходе из топки;  $\prod_{i=1}^N K_i = K_P \cdot K_D \cdot K_{\text{СТ}}$  – произведение коэффициентов для учета влияния рециркуляции, нагрузки котла, ступенчатого сжигания топлива [4].

Концентрация БП  $C_{\text{БП}}^{\Gamma}$ ,  $\text{мг/м}^3$ , в сухих продуктах сгорания мазута на выходе из топочной камеры водогрейного котла, при значениях коэффициента избытка

воздуха  $\alpha = 1,08 \div 1,25$  и объемном теплонапряжении  $q_V = 250 \div 500$  кВт/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$C_{\text{БП}}^{\text{М}} = 10^{-6} \cdot \frac{R \cdot (0,445q_V - 28,0)}{e^{3,5(\alpha-1)}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i, \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент, учитывающий тип форсунки (для паромеханических форсунок  $R = 0,75$ );  $\prod_{i=1}^N K_i = K_D \cdot K_P \cdot K_{\text{СТ}} \cdot K_O$  – произведение коэффициентов для

учета нагрузки котла, подвода газов рециркуляции, ступенчатого сжигания топлива и условий очистки конвективных поверхностей нагрева котла. В исследуемых вариантах период между очистками конвективных поверхностей нагрева водогрейного котла составляет 48 часов, для таких условий  $K_O = 2,5$ . Погрешность приведенной методики составляет не более 20 % [4].

Концентрация мазутной золы, в пересчете на ванадий, с учетом 5 % задержки зольных частиц на конвективных поверхностях нагрева котла определяется по уточненному выражению [4]

$$C_{\text{МЗ}} = 0,587 A \frac{B}{V}, \quad (3)$$

где 0,587 – коэффициент, учитывающий размерность величин;  $A$  – зольность мазута, %;  $B$  – расход мазута, т/ч;  $V$  – объемный расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/с.

Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывался, в соответствии с методикой [5], по выражению

$$K = \frac{59 \cdot M}{C_M \cdot X_M}, \quad (4)$$

здесь  $M$  – массовый выброс БП, кг/с;  $C_M$  – максимальная приземная концентрация БП, нг/м<sup>3</sup>;  $X_M$  – расстояние для наблюдения максимальной приземной концентрации  $C_M$ , м.

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования процессов рассеивания выбросов БП при сжигании природного газа и мазута в газовом котле *ICI REX 75* и газомазутном водогрейном котле КВГМ-20. В качестве режима работы теплогенераторов используется величина тепловой нагрузки  $Q$  в соотношении с номинальным уровнем  $Q_{\text{ном}}$ . Определение максимальных приземных концентраций БП и расстояния для наблюдения расчетных значений  $C_M$  проводилось по методике [5].

Таблица 2

Расчетные экологические показатели теплогенераторов

Режим/ параметр	Содержание бенз(а)пирена, $C_{\text{БП}}$ , нг/м <sup>3</sup>	Приземная концентрация бенз(а)пирена, $C_M$ , нг/м <sup>3</sup>	Максимальное расстояние для наблюдения $C_M$ , $X_M$ , м	Коэффициент турбулентной диффузии, $K$ , м <sup>2</sup> /с
Газовый котел ICI REX 75				
$Q=0,7Q_{\text{ном}}$ ( $\alpha=1,05$ )	46,0	3,3	108,6	2,378
$Q=0,7Q_{\text{ном}}$ ( $\alpha=1,10$ )	38,7	2,9	109,8	2,352

$Q=0,7Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,15$ )	32,5	2,5	110,8	2,367
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,05$ )	24,9	2,4	119,9	2,491
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,10$ )	20,9	2,1	121,0	2,460
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,15$ )	17,5	1,8	122,2	2,473
Газомазутный котел КВГМ-20				
$Q=0,7Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,15$ )	135,1	19,6	375,2	7,813
$Q=0,7Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,20$ )	113,4	16,9	380,1	7,822
$Q=0,7Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,25$ )	95,1	14,6	386,8	7,759
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,15$ )	73,0	13,5	419,4	7,843
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,20$ )	61,3	11,6	425,1	7,870
$Q=Q_{\text{НОМ}}$ ( $\alpha=1,25$ )	51,4	10,0	430,7	7,858

В табл. 3 представлены результаты расчета массового выброса и концентрации мазутной золы, в пересчете на ванадий, в условиях сжигания сернистого мазута (зольность  $A=0,1\%$ ) в водогрейном котле КВГМ-20.

Таблица 3

Концентрации мазутной золы в продуктах сгорания в пересчете на ванадий

Режим/ параметр	Массовый выброс мазутной золы, г/с	Концентрация мазутной золы, $C_{\text{МЗ}}$ , г/м <sup>3</sup>
$Q=0,7Q_{\text{НОМ}}$	74,4	10,3
$Q=0,85Q_{\text{НОМ}}$	90,3	9,9
$Q=Q_{\text{НОМ}}$	106,3	9,5

### Обсуждение результатов

Для котлов малой тепловой мощности БП включен в перечень веществ, подлежащих обязательному экологическому нормированию. Предельно допустимая концентрация (ПДК) БП в атмосферном воздухе равна 1 нг/м<sup>3</sup>. Отметим, что канцерогенное действие БП сохраняется даже при значениях концентраций, меньших ПДК. Поэтому в условиях городской среды необходим жесткий контроль выбросов канцерогенных соединений в атмосферный воздух.

На рис. 1 показана зависимость относительной концентрации БП от максимального расстояния рассеивания газообразного выброса при сжигании природного газа в котле *ICI REX 75*.

В условиях горения природного газа в котле *ICI REX 75* на номинальной нагрузке максимальная концентрация БП на выходе из топочной камеры составила 46 нг/м<sup>3</sup>, минимальная эмиссия равна 17,5 нг/м<sup>3</sup>. Соотношения концентраций БП в продуктах сгорания до и после рассеивания выбросов для данного режима составляют 13,93 и 9,72 (рис. 1). Максимальная приземная концентрация БП в

номинальном режиме работы котла при  $\alpha=1,05$  равна  $2,4 \text{ нг/м}^3$ , в режиме работы котла с 70%-нагрузкой и избытком воздуха  $\alpha=1,15$ , равна  $2,5 \text{ нг/м}^3$ .

На рис. 2 показана зависимость приведенной концентрации БП от максимального расстояния рассеивания выброса в условиях горения мазута в водогрейном котле КВГМ-20.

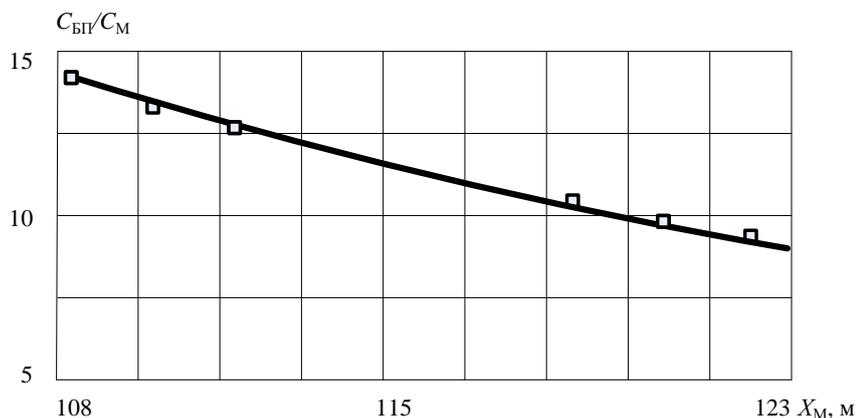


Рис. 1. Приведенная концентрация БП в зависимости от максимального расстояния рассеивания выбросов при горении природного газа в котле ICI REX 75

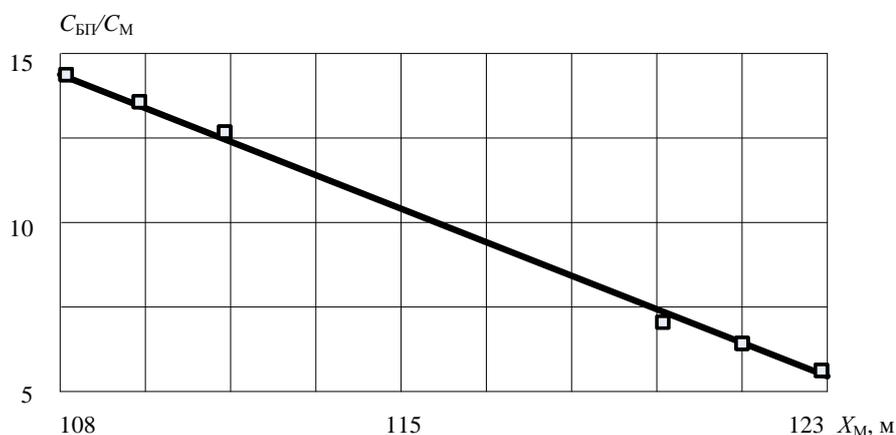


Рис. 2. Приведенная концентрация БП в зависимости от максимального расстояния рассеивания выбросов в условиях сжигания мазута в водогрейном котле КВГМ-20

В процессе сжигания мазута в котле КВГМ-20 при  $Q=Q_{\text{ном}}$  и избытке воздуха  $\alpha=1,15$  максимальное содержание БП на выходе из топочной камеры составляет  $73 \text{ нг/м}^3$ , минимальная концентрация БП при  $Q=0,5Q_{\text{ном}}$  и  $\alpha=1,25$  равна  $51,4 \text{ нг/м}^3$ . Максимальная приземная концентрация БП в номинальном режиме работы котла при  $\alpha=1,15$  равна  $13,5 \text{ нг/м}^3$ , в режиме работы котла с 70%-нагрузкой и избытком воздуха при  $\alpha=1,15$  равна  $19,6 \text{ нг/м}^3$ . Соотношения выбросов БП в продуктах сгорания до и после рассеивания для данных условий составляют 6,89 и 5,14 (рис. 2). Максимальное расстояние для наблюдения приземной концентрации для режима работы  $Q=Q_{\text{ном}}$  и  $\alpha=1,25$  равно 430,7 м (рис. 2). Вычислительный эксперимент показывает, что в результате рассеивания газообразных компонентов сгорания в воздухе атмосферы городской среды концентрация БП в несколько раз превышает

ПДК. Во многих случаях рассеивание затруднено наличием плотной застройки, которая не позволяет активно перемешиваться воздушным потокам ограниченных или застойных зон. Биологическое действие БП на окружающую среду и здоровье человека приводит к необходимости активного внедрения на теплогенерирующих установках котлов малой тепловой мощности, обладающих высоким удельным выбросом БП по сравнению с котлами большой тепловой мощности, высокоэффективного пылегазоочистного оборудования. Современный уровень развития систем удаления твердых частиц из уходящих газов котлов позволяет очистить продукты сгорания на 99,99 %.

### **Выводы**

На основе численного моделирования процессов распространения БП в атмосферном воздухе определены коэффициенты турбулентной диффузии, максимальные расстояния для наблюдения уровней максимальных приземных концентраций и прогнозирования состояния окружающей среды, в целях оптимизации размеров санитарно-защитной зоны отопительной котельной.

Рассчитаны концентрации БП в продуктах сгорания для водогрейного газомазутного котла КВГМ-20 и газового котла *ICI REX 75* в зависимости от эксплуатационных характеристик энергоустановок.

Выполнено определение расчетных концентраций мазутной золы в пересчете на ванадий для различных режимов работы газомазутного котла КВГМ-20 вследствие оказания значимого влияния на суммарную токсичность уходящих газов.

Определены максимальные приземные концентрации БП при рассеивании выбросов в условиях городской среды. Выявлено, что для соблюдения санитарно-гигиенических требований в отношении эмиссии БП и ванадия, необходимо осуществлять мероприятия по очистке продуктов сгорания котлов от сажистых частиц в целях обеспечения требуемого уровня ПДК с учетом фоновых концентраций токсичных соединений.

### **Summary**

*The article discusses the issues of dispersion of emissions of benz(a)pyrene in the air of the atmosphere and its carcinogenic impact on the ecological safety of the environment urban development. A significant influence of polycyclic aromatic hydrocarbons on the formation of the general level of toxicity of gaseous emissions from boilers. The expediency of the accounting of emissions of benz(a)pyrene and vanadium pentoxide in the calculations related to the assessment and optimization of the size of sanitary-protective zone of the heating boiler. Maximum determined surface concentrations of benz(a)pyrene at the scattering in urban areas. The simplified mathematical relationship and a calculation of turbulent diffusion coefficients in the propagation of emissions of benz(a)pyrene from the combustion of natural gas and fuel oil.*

**Keywords:** *the products of combustion, spreading, emissions of benz(a)pyrene.*

### **Литература**

1. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2013. №14(136). С.67-70.
2. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Очистка уходящих газов котельных установок от выбросов бенз(а)пирена // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. №2(94). С.75-78.

3. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник Московского энергетического института. 2015. №2. С.79-82.
4. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. М., 1999.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Л.: Гидрометеоздат, 1987.
6. Иваницкий М.С. Корреляционный анализ взаимного влияния оксидов азота, углерода и бенз(а)пирена на суммарную токсичность уходящих газов котлов. Часть 1. Энергетические котлы большой мощности // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2015. №17-18(181-182). С.138-142.
7. Иваницкий М.С. Суммарная токсичность продуктов сгорания при работе пылеугольных котлов ТЭЦ // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2015. №17-18(181-182). С.148-152.
8. 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.
9. Westerholm R. Some aspects of the distribution of PAH between particles and gas phase from diluted gasoline exhaust generated with the use of dilution tunnel and its validity for measurement in ambient air // R. Westerholm, U. Stenberg, T. Alsberg / Atmospheres Environmental. 1988. V.22. № 5. P.1005-1010.
10. Longwell J. P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion / 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P.1339 –1350.

***Поступила в редакцию***

***09 июня 2016 г.***

***Иваницкий Максим Сергеевич*** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском, Волгоградской области. Тел.: 8(8443)21-01-60, 8-937-725-91-11. E-mail: mseiv@yandex.ru.