

УДК 621.311.22

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ
РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ,
СЖИГАЮЩЕЙ НЕПРОЕКТНОЕ ТОПЛИВО**

М.С. Иваницкий

mseiv@yandex.ru

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Волжском, Россия**

Резюме: В статье выполнено моделирование распределения концентрации твердых (золовых) частиц, образующихся от сжигания нефтяного кокса, в атмосфере прилегающих к котельной территорий при неблагоприятных метеорологических условиях. Установлено влияние класса устойчивости атмосферы на эффективность рассеивания токсичных выбросов. Определены основные климатические характеристики, обеспечивающие санитарно-гигиенические параметры состояния атмосферы воздуха. Показано значительное влияние на процессы рассеивания твердых частиц опасных скоростей ветра в слое атмосферы и рельефа подстилающей поверхности.

Ключевые слова: рассеивание, твердые частицы, нефтяной кокс, котлы системы теплоснабжения.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-129-135

**STATISTICAL MODELING OF DISTRIBUTION OF CONCENTRATION OF
SOLID PARTICLES IN THE ATMOSPHERE DISTRICT LOCATION BOILER,
COMBUSTING NON-PROJECT FUEL**

M.S. Ivanickiy

mseiv@yandex.ru

Branch of the National Research University "MEI" in Volzhsky, Russia

Abstract: In the article modeling distribution of concentration of solid (ash) particles formed from burning petroleum coke, in the atmosphere adjacent to the boiler room of the territories in adverse weather conditions. Established the influence of stability class of the atmosphere on the effectiveness of the dispersion of toxic emissions. Identifies the main climatic characteristics of providing sanitary-hygienic conditions of the atmospheric air. A significant impact on the processes of dispersion of solid particles of dangerous wind speeds in the layer of the atmosphere and topography of the underlying surface.

Keywords: dispersion, a solid particle, petroleum coke, the boilers of the heating system.

Введение

Сжигание в котлах твердого топлива провоцирует образование в продуктах сгорания сажистых (золовых) частиц. Наибольшую опасность в гетерогенных выбросах представляют частицы размером 2,5 и 10 мкм (*particulate matter*), оказывающие

существенное воздействие на здоровье человека. Распределение таких мелких примесей в воздухе атмосферы в зависимости от параметров окружающей среды крайне неоднородное. Интенсивность распределения примесей определяется: величиной массового выброса от источника негативного влияния, классом устойчивости (неустойчивости) [1–3]; турбулентной диффузией компонентов в приземной и пограничных слоях атмосферы. Применение непроектных топлив, например нефтяного кокса, для получения пара в котельных представляет возможность утилизации этого продукта вследствие значимых объемов производства и накопления на нефтеперерабатывающих заводах, например ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка», снижения себестоимости приготовления перегретого пара. Нефтяной кокс на предприятии ООО «ЛУКОЙЛ-Волгограднефтепереработка» получают коксованием крекинговых остатков при средней температуре процесса равной 490°C.

Паровой котел КЕ-10-14С, входящий в состав котельной, предназначен для слоевого сжигания твердого топлива. Паровая производительность котла 2,78 кг/с. Температура перегретого пара на выходе из котла 225°C, давление 1,4 МПа. Котел КЕ-10-14С оборудован системой очистки конвективных поверхностей нагрева от сажи и коксовых частиц [1], образующихся в результате химического и механического недожога топлива.

Технологическое использование нефтяного кокса в котельной предусматривает предварительную подготовку топлива к сжиганию, которая заключается в его измельчении до однородного фракционного состава для уменьшения механической неполноты сгорания. Отметим, что при содержании углерода в составе нефтяного кокса до 92–95% теплотворная способность топлива составляет 32–35 МДж/кг, т.е. сравнима с тепловым эффектом от горения некоторых видов природного газа. Дополнительные затраты электрической энергии на дробление нефтяного кокса способствуют росту собственных нужд котельной. При этом высокая теплотворная способность нефтяного кокса приведет к снижению топливопотребления по сравнению с ранее используемым каменным углем, что в целом сократит удельные капитальные затраты в производство пара и улучшит эксплуатационные экологические показатели котельной.

Численное исследование и моделирование

На основе дифференциального уравнения турбулентной диффузии в [2] получено выражение для определения концентрации примеси над поверхностью Земли в виде

$$C = \frac{M}{4\pi K r} \exp\left(-\frac{u}{2K}(r-x)\right), \quad (1)$$

где M – массовый выброс вещества, г/с; u – средняя скорость перемещения примеси по направлению x , м/с; K – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; r – расстояние до точки пространства, в которой рассчитывается концентрация, м; x – проекция расстояния r на ось x , направленную по ветру, м.

Вследствие распространения примеси над поверхностью Земли [2] и слабого взаимодействия с ней, примесь турбулентными потоками рассеивается в атмосфере.

Принято, что поэтому турбулентный вихрь у поверхности Земли незначителен:

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow 0.$$

Для вариантов, отображающих возможное взаимодействие примеси с поверхностью вводится некоторая постоянная, характеризующая интенсивность реагирования с подстилающей поверхностью. Установлено, что в таких условиях часть примеси возвращается в атмосферу после отражения от подстилающей поверхности. В работе рассмотрены равновесное E и неустойчивое D состояния атмосферы. Описание

статистического метода моделирования переноса примесей в атмосфере с учетом турбулентной диффузии и неоднородностей ветрового воздействия представлено в [2].

Предполагая, что линейные размеры дымовой трубы $\Delta y, \Delta z$ малы по сравнению с x , выражение для расчета концентрации примеси с учетом $\Delta z \rightarrow 0$, $r \approx x$, можно записать в виде зависимости

$$C = \frac{M}{2\pi Kx} \exp\left(-\frac{uH^2}{4Kx}\right), \quad (2)$$

где H – эффективная высота дымовой трубы, м.

Характер изменения скорости ветра с высотой [2] описывается уравнением

$$u = u_{z1} \frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}}, \quad (3)$$

где u_{z1} – скорость ветра на высоте расположения флюгера, м/с; u – текущее значение скорости ветра, м/с; z_1 – высота расположения оси флюгера, м; z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м.

В таблице представлены химический состав и характеристики нефтяного кокса.

Таблица

Химический состав нефтяного кокса						
Марка, класс / состав на рабочую массу, %						
Кокс нефтяной						
W=3	A=0,8	S=1,5	C=92,0	H=2,5	N=0,2	$Q^r = 34,247 \text{ МДж/кг}$

Параметры котельной установки и гетерогенных выбросов, принятые в процессе моделирования распределения концентрации золовых частиц в слоях атмосферы [4–10]: механический недожог равен $q_4 = 3\%$; максимальный выброс твердых частиц $777,6 \text{ кг/ч}$; коэффициент полезного действия котлоагрегата 85% ; скорость выхода дымовых газов из устья трубы $\omega_0 = 5,53 \text{ м/с}$; температура дымовых газов 180°C ; высота дымовой трубы 30 м ; диаметр устья 1 м .

На рис. 1 и 2 показаны результаты численного моделирования процессов распределения твердых частиц в атмосфере территорий, прилегающих к котельной, при различных условиях состояния устойчивости атмосферы (E и D), скорости ветра, величины коэффициента турбулентной диффузии. Расчет основных параметров среды и пространственных распределений концентраций примесей выполнен в соответствии с рекомендациями [2].

График изменения приземной концентрации твердых частиц в санитарно-защитной зоне котельной, сжигающей нефтяной кокс в котлах КЕ-10-14 С, показан на рис. 1. Точки на рис. 1–3 показывают расчетные значения, полученные в результате численных экспериментов.

Анализ рис. 1 показывает, что минимальные значения потока ветра обеспечивают рассеивание на уровне $0,24 \text{ ПДК}$ на расстоянии $X_M = 158,85 \text{ м}$ от котельной. В результате дальнейшего разбавления гетерогенных примесей в воздухе их концентрация снижается до $0,105 \text{ мг/м}^3$. Рассеивание выбросов твердых частиц при опасной скорости ветра $u_m = 10 \text{ м/с}$ определяет минимальное содержание золовых примесей в воздухе атмосферы для $X_M = 100 \text{ м}$, равное $2,62 \cdot 10^{-13} \text{ мг/м}^3$. Для $X_M = 200 \text{ м}$ определена максимальная приземная концентрация твердых частиц, соответствующая $1,68 \cdot 10^{-7} \text{ мг/м}^3$.

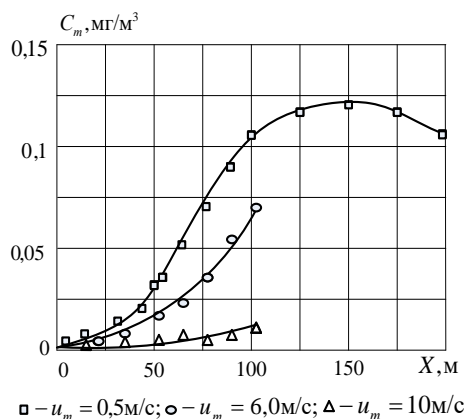


Рис. 1. Изменение приземной концентрации твердых частиц в пределах санитарно-защитной зоны котельной от различных скоростей ветра в слоях атмосферы

Обсуждение результатов

На рис. 2 показана зависимость изменения концентрации золых частиц в атмосфере от средних значений скорости ветра в слоях атмосферы (для опасной скорости ветра $u_m = 2\text{ м/с}$).

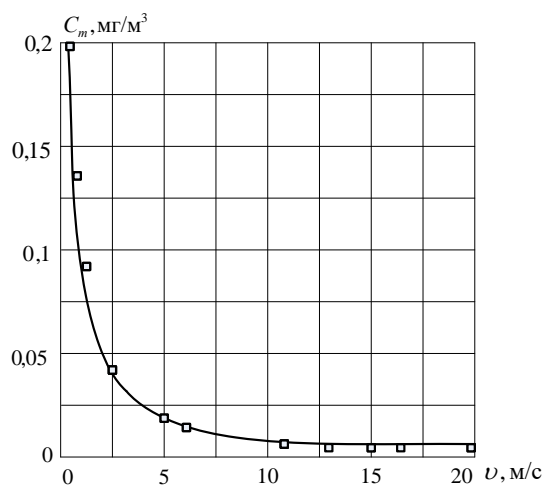


Рис. 2. График распределения концентрации золых частиц в слоях атмосферы от средней скорости ветра в слое

В условиях минимальной скорости ветра в слое $v = 0,5\text{ м/с}$ содержание примеси твердых частиц в воздухе составляет не более $0,2\text{ мг}/\text{м}^3$, что составляет $0,4\text{ ПДК}$. Измерения показали, что для опасной скорости ветра концентрация золых частиц в гетерогенных выбросах для момента рассеивания соответствует $0,05\text{ мг}/\text{м}^3$. Разбавление дымового факела в приземных слоях в пределах роста скорости ветра в слое атмосферы от 6 до 10 м/с приводит к снижению C_m от $0,0166$ до $0,0063\text{ мг}/\text{м}^3$. Результаты расчетов показали, что в зоне расположения котельной для среднегодовой скорости ветра $v = 6\text{ м/с}$ обеспечивается концентрация твердых частиц в воздухе равная $0,03\text{ ПДК}$.

Отметим, что при расчетах не учитывалось влияние восходящих потоков воздуха, обусловленных нагреванием подстилающей поверхности солнечным излучением, на распределение и седиментацию золовых частиц.

На рис. 3 показана зависимость распределения концентрации твердых выбросов в слоях атмосферы от координаты территории, прилегающей к котельной, для опасной скорости ветра $u_m = 2$ м/с.

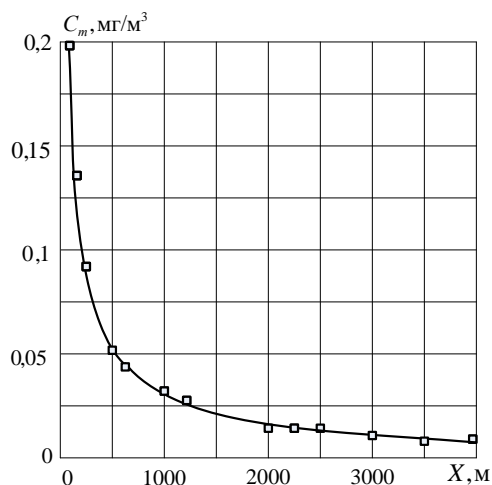


Рис. 3. Распределение концентрации золовых выбросов в слоях атмосферы в зависимости от координаты территории, прилегающей к котельной, для опасной скорости ветра $u_m = 2$ м/с

Для относительного изменения координаты подстилающей поверхности $0 \leq \frac{X}{X_M} \leq 20$ содержание золовых частиц уменьшается в 10 раз до $C_m = 0,02$ мг/м³.

Отметим, что в пределах наблюдения X_M максимальная приземная концентрация составила 0,4 ПДК. Коэффициент турбулентной диффузии вихря $K_z = 0,8$ м²/с в рассмотренных условиях определен для граничных условий $x = X_M$, $C = C_{\max}$, $u = 0,5$ м/с. Характер изменения скорости ветра с высотой выявлен в соответствии с (3) величиной шероховатости подстилающей поверхности $z_0 = 0,03$ м с учетом измеренных значений скоростей ветра на уровне флюгера метеостанции $z_1 = 10$ м. Максимальная концентрация золовых частиц, удовлетворяющая условию $K_z = 0,8$ м²/с, равна 0,112 мг/м³.

Выводы

Установлены валовые выбросы золовых частиц, образующихся в процессе сжигания нефтяного кокса в слоевом твердотопливном котле КЕ-10-14С.

Определены концентрации золовых частиц в воздухе атмосферы в зависимости от метеорологических параметров окружающей среды (скорости ветра в слое, опасной скорости ветра, класса устойчивости атмосферы, коэффициента турбулентной диффузии $K_z = 0,8$ м²/с) в районе расположения котельной.

Выявлены значения средних скоростей ветра и коэффициента турбулентной диффузии в слоях атмосферы, обеспечивающие санитарно-гигиенические показатели рассеивания примесей золовых частиц в воздухе на уровне, не превышающем предельно допустимых концентраций.

Для относительной координаты подстилающей поверхности в диапазоне $0 \leq \frac{X}{X_M} \leq 20$ установлен характер изменения содержания золовых частиц в пространстве рассеивания дымового факела в зоне действия котельной.

Литература

1. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчет парового котла. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.: ил.
2. Волков Э.П., Лысков М.Г., Фетисова Е.И. Методы расчета приземных концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе. Москва: МЭИ, 1991. 56 с.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург: ЦКТИ, ВТИ, 1998. 257 с.
4. Иваницкий М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 5–9.
5. Brorstron-Lunden, E., Lindsleog, A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
6. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
7. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник МЭИ. 2015. №2. С. 79–82.
8. Иваницкий М.С. Суммарная агрессивность газовых выбросов пылеугольных котлов, обусловленная компонентами неполного сгорания // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 5 (97). С. 70–75.
9. 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.
10. Тумановский А.Г., Ольховский Г.Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России // Электрические станции. 2015. № 1. С. 67–73.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Lipov Yu.M., Samoilov Yu.F., Vilenskii T.V. Komponovka i teplovoi raschet parovogo kotla. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 298 s.: il.
2. Volkov E.P., Lyskov M.G., Fetisova E.I. Metody rascheta prizemnykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v atmosfernom vozdukh. Moskva: MEI, 1991. 56 s.
3. Teplovoi raschet kotlov (Normativnyi metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg: TsKTI, VTI, 1998. 257 s.
4. Ivanitskii M.S. Soderzhanie toksichnykh produktov v ukhodyashchikh gazakh perspektivnykh ugol'nykh energoblokov 660 i 1060 MVt // Energobezopasnost' i energosberezhenie. 2016. № 4. S. 5–9.
5. Brorstron-Lunden, E., Lindsleog, A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
6. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
7. Ivanitskii M.S., Griga A.D. Perevod pyleugol'nykh kotlov na szhiganie prirodnogo gaza dlya sokrashcheniya vybrosov benz(a)pirena v vozdushnyi bassein // Vestnik MEI. 2015. №2. S. 79–82.

8. Ivanitskii M.S. Summarnaya agressivnost' gazovykh vybrosov pyleugol'nykh kotlov, obuslovlennaya komponentami nepolnogo sgoraniya // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2015. № 5 (97). S. 70–75.

9. 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.

10. Tumanovskii A.G., Ol'khovskii G.G. Puti sovershenstvovaniya ugol'nykh TES Rossii // Elektricheskie stantsii. 2015. № 1. S. 67–73.

Author of the publication

Ivanitskiy Maxim Sergeevich – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. prof. of the department «Heat and power engineering and thermal engineering» (HPETE), Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).

Поступила в редакцию

22 января 2018 года.