

УДК 621.311.22

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-30-34

## Расчет параметров рассеивания выбросов сернистого ангидрида в районе расположения теплоэлектроцентрали на основе статистических данных

М.С. Иваницкий

Выполнено моделирование рассеивания примесей сернистого ангидрида в воздушном бассейне для района расположения теплоэлектроцентрали, установленной электрической мощностью 497 МВт. Определены концентрации сернистого ангидрида в условиях опасных скоростей ветра и различных классов состояния атмосферы. Выявлены технологические условия обеспечения предельно допустимых концентраций сернистого ангидрида в слоях атмосферы в зависимости от изменяющихся параметров окружающей среды. Отмечено, что изменение концентрации  $\text{SO}_2$  в приземных слоях характеризуется интенсивностью взаимодействия с подстилающей поверхностью. В результате рассеивания вредные компоненты дымового факела на некотором расстоянии от источника отражаются от поверхности Земли, уходят в атмосферу и практически не реагируют с поверхностью вследствие незначительных турбулентных вихрей. Показано, что соблюдение нормативных удельных выбросов возможно только в случае ограничения нагрузки энергоблока. При этом дополнительно следует учитывать наличие зон концентрирования, образующихся в результате суммирования выбросов промышленных предприятий, расположенных в близости с генерирующими системами. Установлено, что состояние устойчивости (неустойчивости) атмосферы, направление движения и скорость ветра способствуют изменению условий для обеспечения приемлемых экологических показателей качества воздуха при рассеивании гетерогенных выбросов. Для ограничения поступления оксидов серы в атмосферу от котлов рассмотрены внутритопочные (режимные) мероприятия, в которых при частичной загрузке котла по мазуту в работе находится верхний ярус горелочных устройств. Отмечено, что данный режим эксплуатации котла сопровождается повышенным недожогом мазута, что приводит к загрязнению экранных поверхностей топочной камеры котла.

*Ключевые слова:* сернистый ангидрид, мазут, рассеивание, предельно допустимая концентрация.

*Для цитирования:* Иваницкий М.С. Расчет параметров рассеивания выбросов сернистого ангидрида в районе расположения теплоэлектроцентрали на основе статистических данных // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 30—34. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-30-34.

## Calculating the Dispersion Parameters of Sulfur Dioxide Emissions in the CHPP Location Region Based on Statistical Data

M.S. Ivanitskiy

The dispersion of sulfur dioxide emissions in the air basin around the combined heat and power plant (CHPP) with an installed electrical capacity of 497 MW is modeled. The sulfur dioxide concentrations that take place in the atmosphere under the conditions of dangerous wind velocities and different atmospheric stability classes are determined. The power generation process-related conditions under which the concentrations of sulfur dioxide in the atmospheric layers are kept within the maximum allowable limits are determined subject to varying environmental parameters. It is pointed out that the variation of  $\text{SO}_2$  concentration in the surface layers is characterized by the intensity of interaction with the underlying surface. The dispersion processes result in that the smoke plume harmful components are reflected from the Earth surface at some distance away from the source, go into the atmosphere and do not interact with the surface almost at all due to an insignificant intensity of turbulent vortices near the ground surface. It is shown that the standardized specific emission levels can only be complied with at the expense of limiting the power unit load. It is also necessary to take into account the presence of pollution concentration zones resulting from the summation of emissions produced by the industrial enterprises located near the power generating systems. It is found that the stability (instability) of the atmosphere and the wind direction and velocity promote changes in the conditions under which acceptable environmental air quality indicators are fulfilled during the dispersion of heterogeneous emissions. To limit the ingress of sulfur oxides into the atmosphere from boilers, certain intra-furnace (fuel combustion mode) measures are considered, according to which only the upper tier of burners is left in operation at partial boiler load in fuel oil. It is pointed out that this boiler operation mode is accompanied by an increased underburning of fuel oil, which causes fouling of the boiler combustion chamber waterwall surfaces.

*Key words:* sulfur dioxide, fuel oil, dispersion, maximum admissible concentration.

*For citation:* Ivanitskiy M.S. Calculating the Dispersion Parameters of Sulfur Dioxide Emissions in the CHPP Location Region Based on Statistical Data. MPEI Vestnik. 2018;2:30—34. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-30-34.

Горение мазута в энергетических котлах приводит к выбросам в атмосферу оксидов серы  $SO_2$  и других вредных веществ [1, 2]. Доля использования мазута для выработки тепловой и электрической энергии в отечественной энергетике составляет не более 6...7 % в суммарном балансе топливопотребления. Высокая частная токсичность и концентрация вредных сернистых веществ в продуктах сгорания котлов накладывают ограничение на их поступление в воздушный бассейн. Они должны быть качественно рассеяны в приземных слоях атмосферы [3 — 7].

Газомазутные котлы ТГМ-84, ТГМ-84А, ТГМ-84Б, БКЗ-420-140 НГМ, установленные на Волжских ТЭЦ и ТЭЦ-2 ООО «ЛУКОЙЛ–Волгоградэнерго» введены в эксплуатацию до 31 декабря 2000 г. Для них, согласно [8], нормативные удельные выбросы (НУВ)  $SO_2$  в пересчете на условное топливо при сжигании мазута равны  $3000 \text{ мг/м}^3$  ( $38 \text{ кг/т.т.}$ ). Отметим, что для котлов, введенных в работу после 1 января 2001 г., удельные выбросы  $SO_2$  составляют  $0,3 \text{ мг/МДж}$  или  $8,8 \text{ кг/т.т.}$ , что в пересчете на сухие дымовые газы соответствует  $700 \text{ мг/м}^3$  для приведенной сернистости мазута  $S^{mp} \geq 0,045 \text{ \%/(МДж/кг)}$  [8].

Вследствие отсутствия на тепловых электростанциях России сероочистных установок предельно допустимые концентрации  $SO_2$  в воздухе на территории санитарно-защитной зоны энергообъекта обеспечиваются только за счет рассеивания гетерогенных выбросов дымовой трубой, несмотря на ужесточающиеся требования в российском экологическом законодательстве с начала 2015 г.

Целью данного исследования является установление условий и характера распределения примесей в приземных слоях атмосферного воздуха в рамках соблюдения НУВ сернистого ангидрида, в значительной степени определяющих режим загрузки и маневренность мазутных энергоблоков теплоэлектроцентралей Волжских ТЭЦ и ТЭЦ-2.

Концентрация примеси сернистого ангидрида в слое атмосферного воздуха с учетом влияния пространственного взаимодействия с подстилающей поверхностью и метеорологических статистических данных вычисляется по выражению [9]:

$$C_{SO_2}(x, y) = \frac{M_{SO_2}}{\pi \sigma_y \sigma_z v} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2} \right) \right], \quad (1)$$

где  $M_{SO_2}$  — массовый выброс сернистого ангидрида, г/с;  $\sigma_y, \sigma_z$  — стандартные отклонения в направлении, перпендикулярном и вертикальном направлению ветра, как функция расстояния от трубы с учетом класса устойчивости атмосферы;  $v$  — средняя скорость ветра в слое, м/с;  $H$  — эффективная высота дымовой трубы, м.

Измеренные метеорологические параметры атмосферного давления и температуры воздуха, направления и скорости ветра, используемые в (1), усреднены за ча-

совой промежуток времени для относительно ровной местности с шероховатостью  $z_0 = 0,03 \text{ м}$ . Направление и скорость ветра измеряли с помощью ультразвукового анемометра WXT-520 фирмы Vaisala, он отличается меньшей инертностью фиксации значений по сравнению с электромеханическими датчиками.

Массовый выброс оксидов серы от энергетических котлов в условиях сжигания мазута рассчитывается по формуле [8]:

$$M_{SO_2} = K_{SO_2} B Q^r,$$

где  $K_{SO_2}$  — удельный выход  $SO_2$ , г/МДж;  $B$  — расход мазута, кг/с;  $Q^r$  — теплота сгорания мазута, МДж/кг.

Удельный выход сернистого ангидрида определяется по уточненному выражению [8]:

$$K_{SO_2} = 2 \cdot 10^{-2} S^{mp} (1 - \tilde{\eta}_{SO_2}) (1 - \tilde{\eta}_S),$$

здесь  $S^{mp}$  — приведенное содержание серы в мазуте на рабочую массу, %;  $\tilde{\eta}_{SO_2}$  — степень улавливания сернистого ангидрида летучей золой;  $\tilde{\eta}_S$  — эффективность сероочистной установки.

Среднее значение скорости ветра в слое вычисляется по [9]:

$$v = \frac{u_\phi \left( \ln \frac{H}{z_0} - 1 \right)}{\ln \frac{z_{10}}{z_0}},$$

где  $u_\phi$  — измеренная фактическая скорость ветра, м/с;  $z_{10}$  — координата установки флюгера метеостанции, м.

В таблице 1 представлен топливный состав мазута, используемого на Волжских ТЭЦ и ТЭЦ-2 в качестве резервного топлива. Доля использования мазута для выработки тепловой и электрической энергии на энергообъектах за рассматриваемый период 2014 — 2015 гг. колеблется в пределах от 31 до 90 %, что в абсолютных величинах составляет от 336 до 976 тыс. тонн. При этом основной объем потребления жидкого топлива приходится на отопительный период.

Таблица 1

Топливный состав мазута М100 по ГОСТ 10585—2013

Марка, класс/состав на рабочую массу, %	
W	0,30
A	0,05
S	2,76
C	81,5
H	11,5
O + N	3,89
$Q^r$	40,086 МДж/кг

В соответствии с данными табл. 1, приведенное топливо по содержанию серы относится к мазутам высокосернистого класса.

Отметим, что для рассмотренных географических условий Волгоградской области среднегодовая скорость ветра составляет 6 м/с. Данный показатель характеризует достаточно высокую степень возможности рассеивания токсичных выбросов электростанции в течение года, но при этом в уточнении нуждается распределение концентраций вредных веществ в неблагоприятных метеорологических условиях, что продемонстрировано на рис. 1.

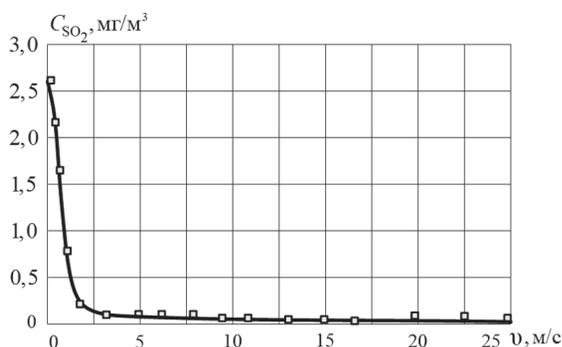


Рис. 1. Распределение концентрации сернистого ангидрида в слоях атмосферы в зависимости от средней скорости ветра в слое

Анализ данных на рис. 1 позволяет заключить, что в случае изменения значений средней скорости ветра в слое от 0,5 до 1 м/с в воздухе атмосферы не обеспечивается предельно допустимая концентрация (ПДК)  $SO_2$ , которая составляет 0,5 мг/м³. В процессе дальнейшего увеличения скорости воздушного потока от 1 до 5 м/с при рассеивании содержания  $SO_2$  уменьшается от 0,5 до 0,05 мг/м³. Последующий рост скорости ветра до 25 м/с демонстрирует асимптотический характер снижения концентрации  $SO_2$  в воздухе атмосферы.

Расчетные значения удельного выхода сернистого ангидрида в уходящих газах котла ТГМ-84Б на различных режимах работы приведены в табл. 2.

Результаты расчета платы за негативное воздействие на окружающую среду выбросов сернистого

ангидрида, приведенные в табл. 2, получены в условиях работы семи энергетических котлов ТГМ-84Б в течение года (4300 ч). Расход мазута в номинальном режиме работы котла — 7,69 кг/с, температура уходящих газов при полной нагрузке котла — 180 °С, степень улавливания сернистого ангидрида летучей золой  $\tilde{\eta}_{SO_2} = 7\%$ .

Изменение концентрации  $SO_2$  в приземных слоях характеризуется интенсивностью взаимодействия с подстилающей поверхностью. В результате рассеивания вредные компоненты дымового факела на некотором расстоянии от источника отражаются от поверхности Земли и уходят в атмосферу. В этом случае токсичные вещества практически не реагируют с поверхностью вследствие незначительных турбулентных вихрей вблизи поверхности Земли. Граничное условие, обуславливающее это обстоятельство имеет вид  $K_z \frac{\partial C}{\partial z} \rightarrow 0$  при  $z \rightarrow 0$ , где  $K_z$  — коэффициент турбулентной диффузии, направленной по оси  $z$  [9].

График, характеризующий изменение максимальной приземной концентрации сернистого ангидрида в воздухе атмосферы приведен на рис. 2.

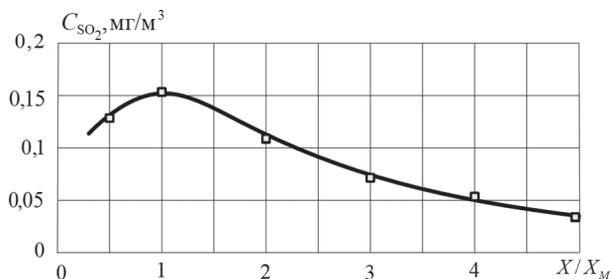


Рис. 2. Изменение максимальной приземной концентрации сернистого ангидрида в воздухе атмосферы

По результатам расчета получено, что для относительной координаты санитарно-защитной зоны теплоэлектроцентрали  $X/X_M$  уровень концентрации  $SO_2$  равен 0,3 ПДК. Опасная скорость ветра при рассеивании

Таблица 2

### Удельные показатели выбросов сернистого ангидрида от парового котла ТГМ-84Б

Параметр	Паровой котел ТГМ-84Б					
	Газомазутный					
Тип котла	Газомазутный					
Марка мазута	М100					
Коэффициент избытка воздуха	1,030	1,050	1,070	1,090	1,110	1,130
Объем сухих продуктов сгорания, м³/кг	10,01	10,22	10,43	10,64	10,85	11,06
Объем влажных продуктов сгорания, м³/кг	11,83	12,04	12,25	12,46	12,67	12,88
Концентрация сернистого ангидрида $C_{SO_2}$ , мг/м³	5128	5023	4922	4825	4732	4642
Удельный выход сернистого ангидрида $K_{SO_2}$ , г/МДж	2,12					
Валовые выбросы сернистого ангидрида, т/год	10140					
Плата за выбросы сернистого ангидрида, млн руб./год*	90,29					

\*В работе одновременно находились 7 котлов ТГМ-84Б

выбросов составила  $u_m = 3$  м/с. На расстоянии  $X/X_M = 5$  от источника выброса содержание сернистого ангидрида в воздухе атмосферы было 0,08 ПДК.

Работа электростанции в режиме установленной мощности (497 МВт) существенно ухудшает экологическую обстановку в районе расположения энергетического комплекса. Годовой массовый выход сернистого ангидрида, приведенный к избытку воздуха, равному  $\alpha = 1,4$  при работе семи котлов ТГМ-84Б (из десяти установленных), составляет 61 824 тонн. Дополнительно следует учитывать наличие зон концентрирования, образующихся в результате суммирования выбросов промышленных предприятий, расположенных поблизости от генерирующих систем Волжских ТЭЦ и ТЭЦ-2. Отметим, что состояние устойчивости (неустойчивости) атмосферы, направление движения и скорость ветра способствуют изменению условий для обеспечения приемлемых экологических показателей качества воздуха при рассеивании гетерогенных выбросов. Рассмотрены состояния устойчивости (неустойчивости) атмосферы классов Е и D.

Результаты моделирования показывают, что для нормирования удельных выбросов  $SO_2$  в воздушный бассейн суммарное содержание серы, включая сероводород, в мазуте не должно превышать  $(S + 0,94H_2S) \geq 2,51$  %. Относительная нагрузка котла ТГМ-84Б в диапазоне ограничения предельно допустимых выбросов  $SO_2$  составляет не более 91,1 %.

В приведенных условиях необходимость контроля уровня температуры дымовых газов за котлом осложнена мероприятиями по предотвращению протекания процессов сернокислотной коррозии конвективных поверхностей нагрева, обивок регенеративного воздухоподогревателя и внутренней поверхности ствола газоотводящей трубы.

В таблице 3 показаны расчетные данные температуры точки росы и допустимых значений температуры уходящих газов в зависимости от содержания серы в исходном топливе.

На рисунке 3 дана зависимость влияния изменения содержания серы в мазуте на допустимую температуру дымовых газов. Анализ данных рис. 3 показывает,

что в случае увеличения содержания серы в исходном топливе на 1 % допустимая температура дымовых возрастает на 28 °С, что приводит к снижению коэффициента полезного действия (КПД) котла на 1,2 %.

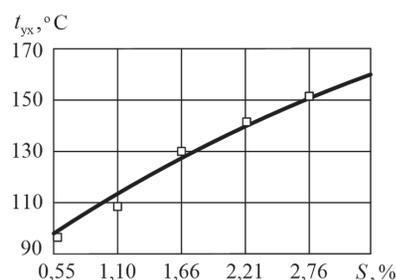


Рис. 3. Зависимость влияния содержания серы в мазуте на допустимую температуру уходящих газов

Кривая, представленная на рис. 3, демонстрирует, что при снижении концентрации серы в мазуте до 1,10...1,66 % температура уходящих газов находится в пределах, обеспечивающих эксплуатацию котла с наиболее оптимальным КПД и допустимым уровнем низкотемпературной сернистой коррозии до 0,2 мм/год.

Для ограничения поступления оксидов серы в атмосферу от котлов Волжской ТЭЦ рассмотрены внутритопочные (режимные) мероприятия в условиях, когда при частичной загрузке котла по мазуту в работе находится верхний ярус горелочных устройств. Таким образом, по теплу обеспечивается нагрузка 38,16 %, что позволяет снизить концентрацию сернистого ангидрида в уходящих газах до 1192 мг/м<sup>3</sup>. Расход природного газа на 4 горелки первого яруса составляет 19872 м<sup>3</sup>/ч. Отметим, что данный режим эксплуатации котла сопровождается повышенным недожогом мазута, что выражается загрязнением экранных поверхностей топочной камеры котла. В этом случае повышение расхода пара на распыл мазута в форсунки на 2...5 % до 0,083 кг/с позволяет несколько улучшить эффективность выгорания тяжелых углеводородов, находящихся в топливе.

Результаты вычислительных экспериментов позволили установить, что сжигание мазута в пределах недогрузки мощности 8,9 % позволит обеспечить НУВ

Таблица 3

### Температура точки росы и допустимые значения температуры уходящих газов от содержания серы в мазутном топливе

Содержание серы в топливе, %	Превышение температуры точки росы над температурой конденсации водяных паров $\Delta t_p$ , °C	Концентрация $SO_2 \cdot 10^4$ в дымовых газах, %	Температура точки росы, °C	Допустимая температура уходящих газов, °C
2,76	82	10,88	131	151
2,21	76	8,700	122	142
1,66	69	6,540	110	130
1,10	60	4,330	89	109
0,55	48	2,160	76	96

сернистого ангидрида от котлов ТЭЦ. Отметим, что в приведенном режиме работы энергоустановок на установленной мощности при наличии практически безветренной погоды  $v \ll 0,5$  м/с наблюдается более чем пятикратное превышение предельно допустимой концентрации сернистого ангидрида в слоях атмосферы санитарно-защитной зоны Волжской ТЭЦ.

Планируемое внедрение наилучших доступных технологий подавления выбросов сернистого ангидрида и других веществ на отечественных тепловых электростанциях позволит обеспечить не только НУВ токсичных компонентов, но и санитарно-гигиенические показатели атмосферы, особенно в условиях расположения энергетических комплексов в черте городской застройки.

### Литература

1. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компонировка и тепловой расчет парового котла. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Котлер В.Р., Рыжий И.А. Решение экологических проблем на угольных котлах ТЭЦ // Энергохозяйство за рубежом. 2014. № 5 (276). С. 22—24.
4. Володин А.М., Епихин А.Н., Федорова С.К. Опыт освоения установок очистки дымовых газов от оксидов серы при сжигании органического топлива на отечественных ТЭС // Электрические станции. 2015. № 1 (1002). С. 83—88.
5. Ziganshin M.G., Ziganshin A.M., Dmitriev A.V. Equipment and Working Conditions for Comprehensive Treatment of Discharges Containing Halogen-bearing Pollutants // Chemical and Petroleum Eng. 2009. V. 45. No. 3 — 4. Pp. 230—235.
6. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50—56.
7. Li Z., Liang M., Jiang J. Investigation of Distribution Rule of Sulfide Located in Ambient Thermal Power Plant // Chinese J. Environmental Eng. 2017. V. 11. No. 2. Pp. 998—1002.
8. ГОСТ Р 50831—95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
9. Волков Э.П., Лысков М.Г., Фетисова Е.И. Методы расчета приземных концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе. М.: Изд-во МЭИ, 1991.

### References

1. Sidel'kovskiy L.N., Yurenev V.N. Kotel'nye Ustanovki Promyshlennyh Predpriyatiy. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
2. Lipov Yu.M., Samoylov Yu.F., Vilenskiy T.V. Komponentovka i Teplovoy Raschet Parovogo Kotla. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
3. Kotler V.R., Ryzhiy I.A. Reshenie Ekologicheskikh Problem na Ugol'nyh Kottlah TETS. Energohozyaystvo za Rubezhom. 2014;5 (276):2—24. (in Russian).
4. Volodin A.M., Epihin A.N., Fedorova S.K. Opyt Osvoeniya Ustanovok Ochistki Dymovyh Gazov ot Oksidov Sery pri Szhiganiy Organicheskogo Topлива na Otechestvennyh TES. Elektricheskie Stantsii. 2015; 1 (1002):83—88. (in Russian).
5. Ziganshin M.G., Ziganshin A.M., Dmitriev A.V. Equipment and Working Conditions for Comprehensive Treatment of Discharges Containing Halogen-bearing Pollutants. Chemical and Petroleum Eng. 2009;45;3 — 4: 230—235.
6. Zvereva E.R., Dmitriev A.V., Shageev M.F., Ahmetvalieva G.R. Rezul'taty Promyshlennyh Ispytaniy Karbonatnoy Prisadki k Mazutu. Teploenergetika. 2017;8: 50—56. (in Russian).
7. Li Z., Liang M., Jiang J. Investigation of Distribution Rule of Sulfide Located in Ambient Thermal Power Plant. Chinese J. Environmental Eng. 2017;11;2:998—1002.
8. GOST R 50831—95. Ustanovki Kotel'nye. Teplomekhanicheskoe Oborudovanie. Obshchie Tekhnicheskie Trebovaniya. (in Russian).
9. Volkov E.P., Lyskov M.G., Fetisova E.I. Metody Rascheta Prizemnyh Kontsentratsiy Vrednyh Veshchestv v Atmosfernom Vozduhe. M.: Izd-vo MPEI, 1991. (in Russian).

### Сведения об авторе

**Иваницкий Максим Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и теплотехники филиала НИУ «МЭИ» в г. Волжском, e-mail: mseiv@yandex.ru

### Information about author

**Ivanitskiy Maksim S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Power Engineering and Heat Engineering Dept., Branch of NRU MPEI in Volzhskiy, e-mail: mseiv@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2017