

4. Tolbert L.M., Peterson W.A., Scudiere M.B., White C.P., Theiss T.J., Andriulli J.B., Ayers C.W., Farquharson G., Ott G.W., Seiber L.E. Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. — September 30–October 4, 2001. — P. 1763–1768.
5. Обухов С.Г., Плотников И.А. Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // Промышленная энергетика. — 2012. — № 7. — С. 46–51.
6. Гаврилов В.В. Математическая модель тепломассообмена при испарении топлива в дизеле // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 5. — С. 57–61.
7. Машенко В.Ю. Программа CYBERDIESEL для математического моделирования топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 4. — С. 62–66.
8. Сайт компании Kipor. 2012. URL: <http://www.kipor.com> (дата обращения: 01.12.2012).
9. Маров Д.Ю. Лабораторный комплекс для исследования режимов работы ветро-дизельной энергетической установки // Современные техника и технологии (СТТ-2012): Сборник трудов XVIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Томск, 2012. — Т. 1. — С. 71–72.
10. Pena R., Cardenas R., Proboste J., Clare J., Asher G. Wind-Diesel Generation Using Doubly Fed Induction Machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2008. — V. 23. — № 1. — P. 202–214.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.181.018: 504.3.054

## ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ОТ КОТЕЛЬНЫХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.С. Тайлашева, Л.Г. Красильникова\*, Е.С. Воронцова

Томский политехнический университет

\*ООО «Спейс-Энергоаудит», г. Томск

E-mail: [taylasheva@tpu.ru](mailto:taylasheva@tpu.ru)

Представлены результаты расчета выбросов вредных веществ в атмосферу от отопительных котельных Томской области. Показано, что предельно допустимая концентрация вредных выбросов не превышена.

### Ключевые слова:

Вредные выбросы, оксиды азота, оксид серы, оксиды углерода, твердые частицы, малая энергетика, котельная, предельно допустимая концентрация.

### Key words:

Noxious emission, nitrogen oxides, sulfur oxide, carbon oxides, solid particles, small energy, boiler house, maximum permissible concentration.

### Введение

Взаимозависимость условий обеспечения теплоэнергоснабжения и загрязнения окружающей среды как факторов жизнедеятельности человека и развития производственных сил привлекает внимание к этому аспекту проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду. Выбросы загрязняющих веществ предприятий теплоэнергетики, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных пылегазовоздушных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его использования, а также с эффективностью в целом работы источника теплоснабжения.

Антропогенные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ — один из основных факторов, обуславливающих изменение химического состава атмосферы и ее теплового баланса. Процессы добычи, переработки и сжигания органического топлива являются источником примерно 80 % суммарных объемов антропогенных выбросов в атмосферу, в том числе 90 % диоксида углерода — глав-

ного парникового компонента атмосферы, изменение содержания которого называют основной причиной современного повышения температуры [1].

При сжигании твердого топлива, прежде всего угля, в атмосферу с дымовыми газами поступает летучая зола, частицы которой содержат углерод, диоксид кремния, окислы алюминия и железа, серу, некоторые органические соединения, тяжелые металлы и другие химические элементы. При сжигании жидкого и газового топлива выход твердых частиц значительно меньше, однако они и газообразные продукты характеризуются высокими концентрациями многих вредных химических веществ [2].

Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют не имеющие средств очистки дымовых газов многочисленные теплоисточники малой мощности, размещаемые, как правило, в пределах небольших населенных пунктов.

Тепло- и энергоснабжение в большинстве районов Томской области лежит на плечах «малой» энергетики, энергоснабжающие организации ко-

торой обеспечивают функционирование промышленного производства, образовательных учреждений, жилых домов и прочих потребителей. В 2009 г. на территории Томской области начата реализация проекта развития малой энергетики в целях внедрения современных высокоэффективных технологий, направленных на повышение качества тепло- и электроснабжения [3]. В рамках реализации проекта предусматривается модернизация ряда отопительных котельных Томской области, эффективность которой в значительной степени определяет экологические параметры, а также стоимость единицы выработанного тепла [4].

#### Методика расчетного анализа

Количество и концентрация загрязняющих веществ, выделяемых в атмосферу, определяются для: контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух; планирования работ по их снижению; установления предельно допустимых и временно согласованных выбросов; утверждения нормативов удельных выбросов.

Для котельных установок нормативы удельных выбросов установлены для следующих загрязняющих веществ: зола твердого топлива, оксиды азота (в пересчете на  $\text{NO}_2$ ), оксиды серы, оксиды углерода [5].

Исследование проводилось аналитическим методом с использованием принятой методики анализа данных [6]. Для расчета валовых выбросов твердых частиц значения необходимых величин для каждого вида топлива выбираются по международным стандартам и справочным данным нормативного метода теплового расчета котлов [7] в соответствии с величиной теплоты сгорания, способом сжигания, производительностью котлов:

$$M_{\text{ТВ}} = B \frac{A^r}{100 - G_{\text{ун}}} a_{\text{ун}} (1 - \eta_3), \text{ т/год (г/с)}. \quad (1)$$

Здесь  $B$  – расход натурального топлива, т/год (г/с);  $A^r$  – зольность топлива на рабочую массу, %;  $a_{\text{ун}}$  – доля золы, уносимой газами из котла;  $\eta_3$  – доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях;  $G_{\text{ун}}$  – содержание горючих в уносе, %.

При расчетах выбросов газообразных веществ использовались справочные и нормативно-технические данные [6, 7], а также паспортные данные котлов.

Расчет выбросов оксидов азота: при сжигании природного газа

$$M_{\text{NO}_x} = B_p Q_i^r K_{\text{NO}_x}^T \beta_i \beta_a \beta_k (1 - \beta_r) (1 - \beta_\delta) k_{\text{П}}, \text{ т/год (г/с)}; \quad (2)$$

при сжигании мазута

$$M_{\text{NO}_x} = B_p Q_i^r K_{\text{NO}_x}^M \beta_i \beta_a \beta_k (1 - \beta_r) (1 - \beta_\delta) k_{\text{П}}, \text{ т/год (г/с)}; \quad (3)$$

при слоевом сжигании твердого топлива

$$M_{\text{NO}_x} = B_p Q_i^r K_{\text{NO}_x}^T \beta_r k_{\text{П}}, \text{ т/год (г/с)}. \quad (4)$$

В данных формулах:  $B_p$  – расчетный расход топлива, т/год (м³/год);  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³);  $K_{\text{NO}_x}$  – удельный выброс оксидов в зависимости от вида сжигаемого топлива;  $\beta_k$  – безразмерный коэффициент, учитывающий принципиальную конструкцию горелок;  $\beta_i$  – безразмерный коэффициент, учитывающий температуру воздуха, подаваемого для горения;  $\beta_a$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние избытка воздуха на образование оксидов вещества;  $\beta_r$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов через горелки на образование оксидов азота;  $\beta_\delta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатый ввод воздуха в топочную камеру;  $k_{\text{П}}$  – коэффициент пересчета (при определении выбросов в граммах в секунду равен 1; при определении выбросов в тоннах в год равен  $10^{-3}$ ).

Расчет выбросов оксида серы:

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 B S^r (1 - \eta'_{\text{SO}_2}) (1 - \eta''_{\text{SO}_2}), \text{ т/год (г/с)}, \quad (5)$$

где  $B$  – расход натурального топлива, т/год (г/с);  $S^r$  – содержание серы в топливе на рабочую массу, %;  $\eta'_{\text{SO}_2}$  – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле;  $\eta''_{\text{SO}_2}$  – доля оксидов серы, улавливаемых в мокром золоуловителе попутно с улавливанием твердых частиц.

Расчет выбросов оксида углерода:

$$M_{\text{CO}} = 10^{-3} B C_{\text{CO}} (1 - \frac{q_4}{100}), \text{ т/год (г/с)}, \quad (6)$$

где  $C_{\text{CO}}$  – выход оксида углерода при сжигании топлива, г/кг (г/м³) или кг/т (кг/м³);  $q_4$  – потери тепла вследствие механической неполноты сгорания топлива, %.

Удельные выбросы загрязняющих веществ рассчитаны исходя из известной величины выбросов в единицу времени и соответствующего этим выбросам расхода топлива. Удельный выброс  $i$ -го вещества может быть определен на единицу вводимого в топку тепла (г/МДж) или выражен в виде концентрации этого вещества в 1 м³ дымовых газов, взятых при нормальных условиях, и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1,4$ .

Концентрация выражается в виде:

$$C_i = n_i \frac{Q_i^r}{V_r} \cdot 10^3, \text{ г/м}^3 \text{ (мг/м}^3\text{)}, \quad (7)$$

где  $n_i$  – удельный выброс  $i$ -го загрязняющего вещества, г/МДж;  $Q_i^r$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;  $V_r$  – объем дымовых газов при нормальных условиях м³/кг (м³/м³).

Удельный выброс выражается в виде:

$$n_i = \frac{M_i}{B Q_i^r}, \text{ г/МДж}, \quad (8)$$

где  $M_i$  – величина  $i$ -го выброса, г/с (т/год);  $B$  – расход топлива, кг/с.

Концентрация диоксида серы, оксидов азота и оксидов углерода определяется по отношению к объему сухих газов, что соответствует условиям из-

мерения этих веществ инструментальными методами. Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) определяются в пересчете на диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ).

Согласно гигиеническим нормам [8] соотношение фактических концентраций веществ к их предельно допустимым концентрациям подлежит суммации, сумма этих значений не должна превышать 1 при расчете по формуле:

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1, \quad (9)$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – фактические концентрации веществ в атмосферном воздухе;  $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \text{ПДК}_n$  – предельно допустимые концентрации тех же веществ в атмосферном воздухе [8].

Объектом исследования являются 7 котельных Томской области разной мощности (от 0,46 до 3,77 МВт), в которых эксплуатируются водогрейные котлы производительностью менее 30 Гкал/час. Для проведения расчетного анализа выбраны котлы следующих заводов-изготовителей: «Евротерм» (Чехия), ООО ПФ «Октан» (г. Омск), «ЭкоДРЕВ» (г. Тверь), ПО «Теплоресурс» (г. Ковров). В зависимости от мощности выбрано необходимое количество котлов – от 2 до 4 для каждой котельной.

В расчетном анализе используются следующие виды топлива:

- каменный уголь Кузнецкого бассейна марки Д (слоевое сжигание);
- низкосернистый мазут марки 40 и 100;
- топливо на основе древесины, спрессованной в древесные гранулы (пеллеты);
- топливо на основе торфа, переработанного в брикеты [9];
- природный газ Томской области для промышленного и коммунально-бытового назначения.

### Результаты

Результатами исследования являются количество валовых выбросов загрязняющих веществ от каждой исследуемой котельной, а также их концентрация в атмосферном воздухе, рассчитанные по формулам (1)–(9). Данные о концентрации позволяют дать оценку уровня загрязнения окружающей среды при сравнении с предельно допустимой концентрацией загрязняющих веществ, эффективности использования сырьевых ресурсов, возможности утилизации отходов на предприятии и др.

Расчетные значения количества выбросов приведены в табл. 1, 2.

Из табл. 1 видно, что наибольшая часть выбросов твердых частиц происходит при сжигании брикетов из торфа, причем диапазон значений составляет от 13 до 103 тонн в год. Минимальные значения концентрации соответствуют вариантам с использованием пеллетов – от 1,2 до 10 тонн в год. Получаемое количество вредных выбросов определяется технологией топливоподготовки, способом сжигания топлива, величиной его зольности, полнотой сгорания горючей массы, но главным фактором при этом является мощность или производительность котельной по топливу.

Наибольшие значения выбросов оксидов азота (табл. 2) соответствуют сжиганию мазута (в диапазоне от 2 до 25 тонн в год) и природного газа (до 15 тонн в год). Величина выбросов от любой из котельных на твердом топливе не превышает 100 кг в год.

Количество образующегося оксида серы напрямую зависит от содержания серы в топливе. Поэтому, естественно, при сжигании природного газа оксиды серы практически не образуются. При работе на угле величина выбросов составляет около 12 тонн в год для котельной мощностью в 3,77 МВт, максимальной из рассматриваемых котельных. Преобладающее количество оксидов углерода (в пределах 12–106 тонн в год) выбрасывается также при сжигании твердого топлива.

В сумме количество выбросов вредных веществ пропорционально мощности котельной, что видно из табл. 1 и 2. Согласно [8], среднесуточная ПДК твердых частиц – 0,02 мг/м<sup>3</sup>, оксидов азота – 0,06 мг/м<sup>3</sup>, оксидов серы – 0,05 мг/м<sup>3</sup>, оксидов углерода – 3 мг/м<sup>3</sup>. Полученные расчетом значения суммы отношений ожидаемых фактических концентраций вредных веществ от котельных к предельно допустимым концентрациям при оценке по формуле (9) не превышают 1, при этом составляют для твердых частиц 0,147...0,875, для газов – 0,0017...0,0275.

### Заключение

Расчетные исследования показали, что ожидаемые фактические концентрации вредных выбросов для различных отопительных котельных Томской области не превышают предельно допустимых. Концентрация вредных выбросов определяется видом сжигаемого топлива, его теплотехническими характеристиками и прямо пропорциональна тепловой мощности котельной.

**Таблица 1.** Количество валовых выбросов твердых частиц

Установленная мощность котельной, МВт	Вид топлива	Расход натурально-го топлива, т/год	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Зольность на рабочую массу топлива, %	Количество валовых выбросов твердых частиц, т/год
Q		B	Q <sub>i</sub>	A'	M <sub>тв</sub>
0,46	Кузнецкий уголь	237,96	23,464	25,00	10,20
	Брикеты из торфа	363,82	15,922	23,00	12,81
	Пеллеты	325,30	16,76	1,50	1,24
	Мазут	127,94	39,805	0,03	–
	Природный газ	144,58	35,615	–	–
0,95	Кузнецкий уголь	478,71	23,464	25,00	20,52
	Брикеты из торфа	731,92	15,922	23,00	25,77
	Пеллеты	654,42	16,76	1,50	2,50
	Мазут	257,38	39,805	0,03	–
	Природный газ	290,86	35,615	–	–
1,13	Кузнецкий уголь	561,76	23,464	25,00	24,08
	Брикеты из торфа	858,90	15,922	23,00	30,24
	Пеллеты	767,96	16,76	1,50	2,94
	Мазут	302,03	39,805	0,03	–
	Природный газ	341,31	35,615	–	–
1,33	Кузнецкий уголь	672,99	23,464	25,00	28,84
	Брикеты из торфа	1028,97	15,922	23,00	36,22
	Пеллеты	920,02	16,76	1,50	3,52
	Мазут	361,83	39,805	0,03	–
	Природный газ	408,90	35,615	–	–
1,63	Кузнецкий уголь	824,89	23,464	25,00	35,35
	Брикеты из торфа	1261,21	15,922	23,00	44,40
	Пеллеты	1127,67	16,76	1,50	4,32
	Мазут	443,50	39,805	0,03	–
	Природный газ	501,19	35,615	–	–
2,73	Кузнецкий уголь	1380,62	23,464	25,00	59,17
	Брикеты из торфа	2110,90	15,922	23,00	74,31
	Пеллеты	1887,39	16,76	1,50	7,22
	Мазут	742,29	39,805	0,03	–
	Природный газ	838,84	35,615	–	–
3,77	Кузнецкий уголь	1909,25	23,464	25,00	81,82
	Брикеты из торфа	2919,14	15,922	23,00	102,77
	Пеллеты	2610,05	16,76	1,50	9,99
	Мазут	1026,51	39,805	0,03	–
	Природный газ	1160,02	35,615	–	–

**Таблица 2.** Количество валовых выбросов газообразных веществ

Установленная мощность котельной, МВт	Вид топлива	Суммарное количество NO <sub>x</sub> в пересчете на NO <sub>2</sub> , т/год	Суммарное количество SO <sub>2</sub> , т/год	Суммарное количество CO, т/год
Q		M <sub>NO2</sub>	M <sub>SO2</sub>	M <sub>CO</sub>
0,46	Кузнецкий уголь	0,008	1,4277	11,82
	Брикеты из торфа	0,006	1,0915	12,93
	Пеллеты	0,005	0,1952	12,17
	Мазут	2,027	0,9467	0,38
0,95	Природный газ	0,880	–	0,59
	Кузнецкий уголь	0,018	2,8723	24,28
	Брикеты из торфа	0,015	2,1958	26,55
	Пеллеты	0,012	0,3927	24,99
1,13	Мазут	4,608	1,9046	0,77
	Природный газ	2,250	–	1,20
	Кузнецкий уголь	0,023	3,3705	28,86
	Брикеты из торфа	0,018	2,5767	31,55
1,33	Пеллеты	0,014	0,4608	29,69
	Мазут	5,594	2,2350	0,92
	Природный газ	2,808	–	1,43
	Кузнецкий уголь	0,028	4,0379	34,14
1,63	Брикеты из торфа	0,023	3,0869	37,32
	Пеллеты	0,018	0,5520	35,13
	Мазут	6,937	2,6776	1,09
	Природный газ	3,577	–	1,69
2,73	Кузнецкий уголь	0,030	4,9493	41,84
	Брикеты из торфа	0,025	3,7836	45,74
	Пеллеты	0,020	0,6766	43,05
	Мазут	8,888	3,2819	1,33
	Природный газ	4,730	0,0000	2,07
3,77	Кузнецкий уголь	0,055	8,2837	70,03
	Брикеты из торфа	0,044	6,3327	76,56
	Пеллеты	0,035	1,1324	72,06
	Мазут	16,829	5,4930	2,23
	Природный газ	9,679	–	3,47
3,77	Кузнецкий уголь	0,088	11,4555	96,84
	Брикеты из торфа	0,079	8,7574	105,88
	Пеллеты	0,054	1,5660	99,65
	Мазут	25,368	7,5962	3,08
	Природный газ	15,272	–	4,80

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Клименко В.В., Терёшин А.Г. Мировая энергетика и глобальный климат после 2100 года // Теплоэнергетика. – 2010. – № 12. – С. 38–44.
- Буренин В.В. Очистка и обезвреживание пылегазовоздушных выбросов предприятий теплоэнергетики // Промышленная теплоэнергетика. – 2009. – № 8. – С. 49–54.
- Ушаков В.Я. Повышение энергоэффективности экономики России: планы и действия // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 52–56.
- Красильникова Л.Г., Лукьянец А.А., Нечай М.Г., Федецкий И.И. Тарифное регулирование локальных рынков теплоснабжения Томской области на основе функционально-стоимостного и технологического анализа. – Томск: Изд-во ГУП РПО СО РАСХН, 2004. – 360 с.
- Временные методические указания по установлению технических (максимально допустимых) нормативов удельных выбросов

- загрязняющих веществ в атмосферу для действующих котельных установок. Введ. 2001.02.13. – М.: Изд-во ВТИ, 2001. – 6 с.
- Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара час или менее 30 Гкал в час. Введ. 2000.01.01. – М.: Гос. ком. Рос. Федерации по охране окр. среды, 1999. – 27 с.
- Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
- ГН 2.1.6.1338–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Введ. 2003.05.30. – М.: М-во Здравоохранения Рос. Федерации, 2003. – 60 с.
- Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 18–21.

Поступила 13.03.2013 г.