

**СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САЖИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОТОПЛИВНЫХ  
ЭМУЛЬСИЙ В КОТЛОАГРЕГАТАХ ТИПА КЕВ-4-14**

**Молдобаев М.Б.<sup>1</sup>, Самбаева Д.А.<sup>1</sup>, Маймеков З.К.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИГД и ГТ, <sup>2</sup>КТУ “Манас”, Бишкек, Кыргызстан, [z.maymekov@mail.ru](mailto:z.maymekov@mail.ru)

*Аннотация:* Приведены данные по снижению концентрации сажи в газовой фазе за счет модифицирования жидкого топлива в виде водотопливных эмульсий и сжигания их в котлоагрегатах типа КЕВ-4-14, а также результаты расчета величины техногенного ущерба.

**Ключевые слова:** частицы сажи, средняя и малая мощность, техногенная сажа, газовая фаза.

**REDUCING THE CONCENTRATION OF SOOT IN THE GAS PHASE BASED  
ON USE WATER EMULSION IN BOILER TYPE KEV-4-14**

**Moldobaev M.B.<sup>1</sup>, Sambaeva D.A.<sup>1</sup>, Maimakov Z.K.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of mining and mining technologies, <sup>2</sup>Kyrgyz-Turkish university of Manas

*Abstract:* The article data on decrease concentration of soot are provided in a gas phase due to the modification of liquid fuel in the form of water-fuel emulsions and their burning in boiler type KEV-4-14 and the results of calculation of size technogenic damage.

**Key words:** soot particles, medium and low power, technogenic soot, gas phase.

Одним из загрязняющих атмосферу компонентов продуктов сжигания углеводородных топлив являются частицы сажи, отличающиеся высокой стабильностью и, следовательно, способностью к длительному сохранению в условиях окружающей среды. Отмеченная особенность, а также возможность адсорбции на поверхности частиц сажи канцерогенных веществ требуют разработки и осуществления эффективных природоохранных мер по снижению выбросов частиц сажи в котлоагрегатах средней и малой мощности [1-12].

С учетом изложенных выше обстоятельств в работе рассмотрены источники загрязнения окружающей среды техногенной сажой ( $C_T$ ) энергетических установок средней и малой мощности типа КЕВ-4-14.

Изучены процессы конверсии техногенной сажи в парогазовой среде в широких спектрах изменения температуры и найдены спектры концентрационного распределения углеродсодержащих частиц в газовой фазе, в том числе конденсированного углерода (рис. 1 и табл. 1, 2).

Определены экологические и производственно-хозяйственные стандарты источников, необходимые для анализа эколого-экономических основ оценки ущерба от загрязнения окружающей природной среды техногенной сажой (табл. 3-5).

Осуществлен анализ эмиссии сажи дымовых газов и методологические основы взимания платежей за загрязнение окружающей природной среды техногенной сажой.

Достигнута минимизация содержания сажи в приземном слое атмосферного воздуха на основе приготовления и использования в качестве жидкого топлива водотопливных эмульсий в энергетических установках средней и малой мощности типа КЕВ-4-14.

Полученные результаты полезны в развитии теории и практики оптимизации процесса сжигания топлива в виде водотопливных эмульсий и снижения токсичных углеводородных частиц в приземном слое атмосферного воздуха, а также в использовании рыночного механизма взимания платежей за загрязнение окружающей среды техногенной сажой.

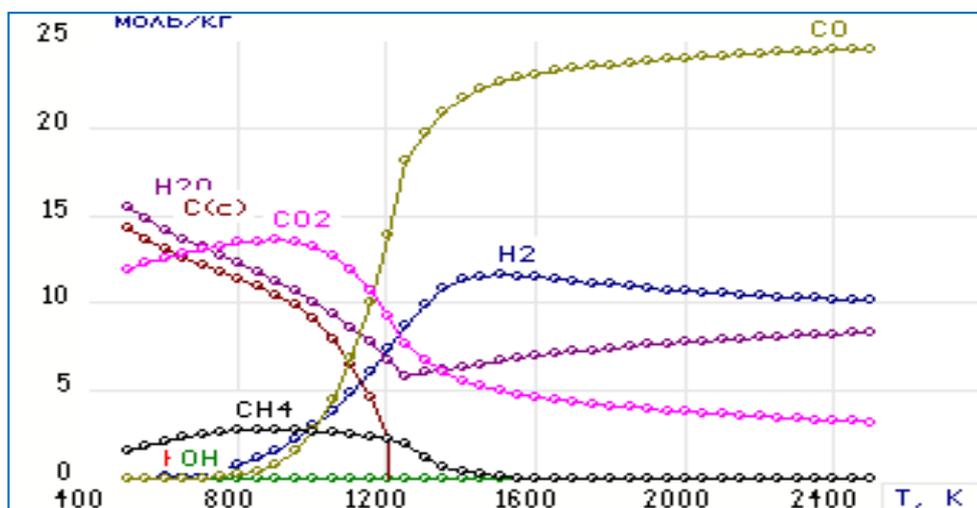


Рис.1. Равновесные составы и концентрации компонентов, образующихся в системе C-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub> (1:1:1), C-27,752; H-37,006; O-39,337 при P=10 МПа

Изменение свойств системы: C-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub> (1:1:1) при P=10 МПа, T=500-2500К,  $\mu=44,27$  моль/кг,  $MMq=24,21$  г/моль,  $Rq=349,20$  Дж/(кг·К),  $z=0,14$

Таблица 1

| T, К | $V \cdot 10^2$ , м <sup>3</sup> /кг | S, кДж/(кг·К) | I, кДж/кг | U, кДж/кг | $C_p \cdot 10^4$ , кДж/(кг·К) | $\mu \cdot 10^5$ , Па·с | $L_t \cdot 10^5$ , Вт/(м·К) | $Pr \cdot 10^3$ |
|------|-------------------------------------|---------------|-----------|-----------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 500  | 1,20                                | 5,58          | -8296,27  | -8344,81  | 14601,4                       | 2,08                    | 5630                        | 517,89          |
| 750  | 1,82                                | 6,24          | -7886,15  | -7995,87  | 19534,7                       | 2,99                    | 37015                       | 157,94          |
| 1000 | 2,64                                | 7,096         | -7124,43  | -7309,83  | 49084,1                       | 3,79                    | 125507                      | 141,73          |
| 1250 | 4,40                                | 8,88          | -5100,87  | -5436,01  | 60990,1                       | 4,47                    | 106762                      | 255,16          |
| 1500 | 5,74                                | 9,58          | -4157,48  | -4617,44  | 22386,1                       | 5,08                    | 17954,6                     | 633,08          |
| 1750 | 6,73                                | 9,88          | -3658,68  | -4216,87  | 19108,9                       | 5,63                    | 19531,4                     | 550,86          |
| 2000 | 7,69                                | 10,14         | -3181,54  | -3836,04  | 19145,5                       | 6,16                    | 21638,4                     | 544,62          |
| 2250 | 8,66                                | 10,37         | -2699,19  | -3449,98  | 19480,1                       | 6,66                    | 23709,3                     | 546,99          |
| 2500 | 9,62                                | 10,58         | -2205,06  | -3052,43  | 20115,9                       | 7,14                    | 26340,6                     | 545,27          |

В результате проведенных исследований выявлены источники загрязнения окружающей среды техногенной сажей энергетических установок средней и малой мощности типа КЕ<sub>в</sub>-4-14. Изучены процессы окисления техногенной сажи в парогазовой фазе и найдены спектры концентрационного распределения углеродсодержащих частиц в газовой фазе (табл.2). Установлены изменения энергетических и вязкостных свойств системы C-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub> при различных значениях температуры и давления газо-жидкостных потоков, а также при  $I < 0$  и  $U < 0$  (табл.1). Осуществлен анализ эмиссии техногенной сажи и составлены методологические основы взимания платежей за загрязнение окружающей природной среды техногенной сажей (табл.4-5).

Рассчитаны эколого-экономические параметры оценки ущерба от загрязнения окружающей природной среды техногенной сажей. Показано, что при использовании и сжигания водотопливных эмульсий снижаются газовые выбросы, в том числе и сажа, а также величины ущерба, обусловленного техногенной нагрузкой загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха.

Равновесные составы и концентрации компонентов (моль/кг), образующихся в системе:  
C-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub> (1:1:1) при P=10 МПа, T=500-2500 К

Таблица 2

| Состав                         | Температура, К |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                | 500            | 750      | 1000     | 1250     | 1500     | 1750     | 2000     | 2250     | 2500     |
| O                              | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,48E-20 | 6,72E-16 | 2,02E-12 | 7,54E-10 | 6,45E-08 | 2,05E-06 | 3,25E-05 |
| O <sub>2</sub>                 | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 2,78E-20 | 2,22E-16 | 5,4E-13  | 2,2E-10  | 2,01E-08 | 6,67E-07 | 1,09E-05 |
| H                              | 4,32E-22       | 1,2E-13  | 2,21E-09 | 9,32E-07 | 4,07E-05 | 0,000529 | 0,003623 | 0,016298 | 0,054533 |
| H <sub>2</sub>                 | 0,013347       | 0,48992  | 2,9814   | 8,7536   | 11,595   | 11,1468  | 10,7019  | 10,379   | 10,1336  |
| OH                             | 1,93E-22       | 5,24E-16 | 1,66E-11 | 6,39E-09 | 6,66E-07 | 2,03E-05 | 0,000262 | 0,001898 | 0,009219 |
| HO <sub>2</sub>                | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,93E-22 | 1,69E-18 | 4,96E-15 | 2,1E-12  | 1,97E-10 | 6,68E-09 | 1,11E-07 |
| H <sub>2</sub> O               | 15,4213        | 12,7292  | 10,1188  | 5,84231  | 6,6826   | 7,34109  | 7,79679  | 8,11389  | 8,33672  |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 8,56E-18 | 5E-15    | 1,52E-12 | 1,17E-10 | 3,05E-09 | 3,84E-08 | 2,89E-07 |
| C(c)                           | 14,2603        | 11,7648  | 9,08175  | 6,22E-23 | 1E-30    | 1E-30    | 1E-30    | 1E-30    | 2,86E-30 |
| C                              | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,93E-22 | 1,93E-22 | 1,17E-18 | 8,5E-16  | 1,18E-13 | 5,54E-12 | 5,54E-12 |
| CO                             | 7,54E-05       | 0,083204 | 2,71985  | 18,1022  | 22,6251  | 23,4942  | 23,9626  | 24,2827  | 24,5129  |
| CO <sub>2</sub>                | 11,9578        | 13,2623  | 13,2491  | 7,69599  | 5,01436  | 4,25058  | 3,78837  | 3,46889  | 3,23853  |
| C <sub>2</sub> O               | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,45E-19 | 1,58E-14 | 1,99E-12 | 4,18E-11 | 4,09E-10 | 2,46E-09 | 1,05E-08 |
| C <sub>3</sub> O <sub>2</sub>  | 1,93E-22       | 1,87E-17 | 2,73E-12 | 1,81E-09 | 3,01E-09 | 2,71E-09 | 2,5E-09  | 2,41E-09 | 2,37E-09 |
| CH                             | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,93E-22 | 1,5E-19  | 3,81E-16 | 6,53E-14 | 3,06E-12 | 6,16E-11 | 6,87E-10 |
| CH <sub>2</sub>                | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 9,02E-18 | 2,65E-13 | 2,45E-11 | 3,58E-10 | 2,62E-09 | 1,24E-08 | 4,32E-08 |
| CH <sub>3</sub>                | 4,76E-19       | 9,49E-12 | 3,68E-08 | 4,24E-06 | 8,31E-06 | 7,07E-06 | 6,15E-06 | 5,58E-06 | 5,21E-06 |
| CH <sub>4</sub>                | 1,53414        | 2,64169  | 2,70063  | 1,95238  | 0,112407 | 0,007169 | 0,000907 | 0,000188 | 5,46E-05 |
| C <sub>2</sub> H               | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 1,15E-21 | 7,92E-16 | 1,11E-13 | 1,79E-12 | 1,43E-11 | 7,41E-11 | 2,82E-10 |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 1,93E-22       | 7,46E-14 | 3,78E-09 | 2,27E-06 | 2,46E-06 | 1,12E-06 | 6,16E-07 | 3,98E-07 | 2,87E-07 |
| C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>  | 1,93E-22       | 4,85E-18 | 1,59E-12 | 2,49E-09 | 4,3E-09  | 2,49E-09 | 1,62E-09 | 1,19E-09 | 9,53E-10 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 2,17E-12       | 1,01E-07 | 0,000017 | 0,000252 | 1,67E-05 | 8,65E-07 | 9,28E-08 | 1,69E-08 | 4,45E-09 |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>  | 1,31E-20       | 2,29E-13 | 6,75E-10 | 4,83E-08 | 7,69E-09 | 6,79E-10 | 1,08E-10 | 2,7E-11  | 9,11E-12 |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 6,81E-06       | 0,000142 | 0,000434 | 0,00045  | 3,66E-06 | 3,56E-08 | 1,09E-09 | 7,6E-11  | 9,33E-12 |
| C <sub>3</sub> H               | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 2,85E-21 | 3,13E-15 | 9,17E-14 | 3,55E-13 | 9,65E-13 | 2,17E-12 | 4,25E-12 |
| C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>  | 1,93E-22       | 2,34E-22 | 3,43E-16 | 1,15E-12 | 4,43E-13 | 6E-14    | 1,33E-14 | 4,31E-15 | 1,82E-15 |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 4,06E-20       | 5,05E-14 | 3,9E-11  | 1,11E-09 | 1,29E-11 | 1,21E-13 | 3,66E-15 | 2,56E-16 | 3,22E-17 |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 3,24E-10       | 3,82E-08 | 2,48E-07 | 3,08E-07 | 3,2E-10  | 4,44E-13 | 3,11E-15 | 6,84E-17 | 3,31E-18 |
| C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>  | 1,93E-22       | 1,93E-22 | 4,6E-16  | 1,87E-11 | 8,07E-12 | 1,05E-12 | 2,27E-13 | 7,25E-14 | 3,04E-14 |
| C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>  | 1,93E-22       | 3,09E-20 | 1,52E-15 | 5,04E-13 | 4,71E-15 | 2,82E-17 | 6,08E-19 | 3,33E-20 | 3,48E-21 |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 2,23E-14       | 1,32E-11 | 1,74E-10 | 2,52E-10 | 3,26E-14 | 6,42E-18 | 1,04E-20 | 1,93E-22 | 1,93E-22 |
| C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>  | 1,93E-22       | 4,73E-18 | 8,72E-14 | 1,57E-11 | 1,51E-14 | 1,33E-17 | 6,83E-20 | 1,24E-21 | 1,93E-22 |

Техническая характеристика котлоагрегата

Таблица 3

| Котлоагрегаты    | H (м) | D (м) | V (м <sup>3</sup> /сек) | T <sub>т.г.</sub> (°C) | T (год) | U (м/с) |
|------------------|-------|-------|-------------------------|------------------------|---------|---------|
| КЕВ- 4- 14(2штг) | 25    | 1,0   | 5,44                    | 130                    | 0,416   | 3,0     |

Результаты расчета

Таблица 5

| $C_{сажа}^{Маз}$ (мг/м <sup>3</sup> ) | $m_{сажа}^{Маз}$ (т/год) | $C_{сажа}^{ВМЭ}$ (мг/м <sup>3</sup> ) | $m_{сажа}^{ВМЭ}$ (т/год) | $У_{сажа}^{Маз.}$ (сом/год) | $У_{сажа}^{ВМЭ}$ (сом/год) | $\Delta У$ (сом/год) |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| 61,5                                  | 4,39                     | 20,3                                  | 1,45                     | 8641,95                     | 2852,55                    | 5789,4               |

Расчет ущерба от загрязнения сажей

Таблица 4

| Параметры         | Расчеты   |
|-------------------|---|
| $Y$               | $Y = \gamma \times G \times f \times M$   |
| $f$               | $f = \frac{100}{100 + 2,56 \times 25} \times \frac{4}{1 + 3} = 0,61$  |
| $M$               | $M = A_i \times m_i;$   |
|                   | $m_{сажа} = C_{сажа} Q;$  |
|                   | <b>а) мазут:</b>  |
| $m_{сажа}^{Маз.}$ | $m_{сажа}^{Маз.} = 61,5 \text{ мг} / \text{м}^3 \times 5,44 \text{ м}^3 / \text{сек} = 334,56 \text{ мг} / \text{сек}$  |
|                   | $m_{сажа}^{Маз.} = 334,56 \text{ мг} / \text{сек} \times \frac{1 \text{ т}}{10^9 \text{ мг}} \times \frac{31557600 \text{ сек}}{1 \text{ год}} \times$        |
|                   | $\times 0,416 = 4,39 \text{ т} / \text{год}$  |
|                   | $M_{сажа}^{Маз.} = 240 \times 4,39 \text{ т} / \text{год} = 1054,10 \text{ т} / \text{год}$   |
| $Y_{сажа}^{Маз.}$ | $Y_{сажа}^{Маз.} = 3,36 \times 4 \times 0,61 \times 1054,10 = 8641,95 \text{ сом} / \text{год}$   |
|                   | <b>б) водо - мазутная эмульсия (ВМЭ)</b>  |
|                   | $m_{сажа}^{ВМЭ} = 20,3 \text{ мг} / \text{м}^3 \times 5,44 \text{ м}^3 / \text{сек} = 110,43 \text{ мг} / \text{сек}$   |
|                   | $m_{сажа}^{ВМЭ} = 110,43 \text{ мг} / \text{сек} \times \frac{1 \text{ т}}{10^9 \text{ мг}} \times \frac{31557600 \text{ сек}}{1 \text{ год}} \times 0,416 =$ |
|                   | $= 1,45 \text{ т} / \text{год}$   |
|                   | $M_{сажа}^{ВМЭ} = 240 \times 1,45 \text{ т} / \text{год} = 347,94 \text{ т} / \text{год}$   |
| $Y_{сажа}^{ВМЭ}$  | $Y_{сажа}^{ВМЭ} = 3,36 \times 4 \times 0,61 \times 347,94 = 2852,55 \text{ сом} / \text{год}$   |
| $\Delta Y$        | $\Delta Y = Y_{сажа}^{Маз.} - Y_{сажа}^{ВМЭ};$  |
|                   | $\Delta Y = 8641,95 - 2852,55 = 5789,4 \text{ сом} / \text{год}$  |

Использованная литература

1. Маймеков З.К., Самбаева Д.А. и др. Техногендик газдардын көлөмдүк концентрацияларынын температурага айланыштуу өзгөрүүсү. – Б., 2013. – С.9-12.
2. Блазовски В.С. Зависимость сажеобразования от характеристик; смеси топлива и условий горения // Энергетические машины и установки. – М., 1980. - №2. - С.150.
3. Головина Е. Высокотемпературное горение и газификация углерода. – М., 1983. – 176 с.
4. Кнорре В.Г. и др. Модель процесса сажеобразования. – М., 1986. – С. 116-120.
5. Чигир Н.А. Образование и разложение загрязн. веществ в пламени. – М., 1981. – 407 с.
6. Суровкин В.Ф. Аналитическое описание процессов зародышеобраз. и роста частиц сажи при терм. разл. аромат. углеводородов в газовой фазе. – М., 1976. – С. 111-112.
7. Талантов А.В. Горение в потоке. – М.: Машиностроение, 1978. – 160 с.
8. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. – М., 1972. – 136 с.
9. Теснер П.А. Образование сажи при горении. – М., 1979. – С 3-13.
10. Хоулт Д. Образование сажи в вихревой лабораторной горелке. – М., 1981. – С. 35-36.
11. Champagne D.L. Standard measurement of aircraft gas turbine engine exhaust smoke// ASME Paper N71-GT-88. 1971. – P. 11.
12. Fanner P., Edelman R., Wong E. Particulate carbon formation during combustion. N-Y-L: Plenum Press, 1981. – P. 229-317.