

УДК 621.311.22

DOI 10.18635/2071-2219-2017-1-5-9

## Влияние режимных характеристик топочной камеры пылеугольного котла на выход токсичных соединений

М. С. Иваницкий,

филлиал НИУ МЭИ в г. Волжском,

доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника»,

кандидат технических наук

Повышение доли угля в общем балансе топливопотребления в теплоэнергетике предполагает улучшение эффективности его использования за счет внедрения современных технологий сжигания и обработки продуктов сгорания на тепловых электростанциях. Применение высокоэффективных технологий утилизации токсичных примесей уходящих газов сопровождается значительными эксплуатационными издержками производства тепловой и электрической энергии. Наиболее экономически приемлемыми способами снижения выбросов вредных веществ на отечественных генерирующих предприятиях являются режимные внутритопочные мероприятия, основанные на регулировании температуры в зоне активного горения, но в современных условиях работы теплогенерирующего оборудования из-за отсутствия надежных датчиков и измерительных систем контроля температуры в топочной камере ее определение осуществляется на основе моделирования топочных процессов.

**Ключевые слова:** бенз(а)пирен, угольное топливо, моделирование, температурный режим, экологические характеристики.

Сжигание угольного топлива в котлах тепловых электростанций способствует образованию полициклических ароматических углеводородов, включая канцерогенные соединения аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен и другие. Качественным индикатором наличия в продуктах сгорания всех представителей полициклических ароматических углеводородов является бенз(а)пирен. Температура на выходе из зоны активного горения котлов определяет механизм и скорость генерирования бенз(а)пирена; он начинает интенсивно образовываться при температуре в топке ниже 850 °С, причем его образование для этого уровня температуры происходит по дифенильному механизму, а для условий более 1500 °С – по ацетиленовому радикальному процессу, основанному на карбеновом пиролизе органических соединений. Образование бенз(а)пирена происходит одновременно с генерированием в продуктах сгорания нитрозных газов, обладающих совместно с ним синергетическим токсичным действием [1–3].

Мутагенно-активными являются также супертоксичные полихлорированные дибензо-*n*-диоксины и дибензофураны (экоотоксиканты), наиболее опасным среди которых является 2,3,7,8-тетрахлордибензо-*n*-диоксин C<sub>12</sub>O<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>, принятый Организацией Объединенных Наций в качестве международного токсического эквивалента – International Toxicity Equivalent. Его предельно допустимая концентрация в атмосфере составляет не более 5·10<sup>-4</sup> нг/м<sup>3</sup>. Важным является сокращение выбросов этого соединения в условиях сжигания углей, содержащих хлористые компоненты.

Для определения зависимости влияния уровня температуры на выходе из зоны активного горения на концентрацию нитрозных газов и бенз(а)пирена в продук-

тах сгорания выполнено моделирование режимов работы топочной камеры твердотопливного котла, сжигающего подмосковный уголь, спроектированного на суперсверхкритические параметры пара и перспективного к использованию в отечественной энергетике.

Температура в зоне активного горения  $v_{3AG}$ , °С, определяется методом последовательных приближений по формуле [4]:

$$v_{3AG} = \frac{100}{100 - q_4} \cdot \beta_{CT} \cdot Q_n^p + Q_{возд} + Q_{топл} - \frac{2,05 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_r \cdot (\psi F) \cdot T_{3AG}^4}{B_p \cdot (V_c)_r \cdot 10^3}, \quad (1)$$

где  $q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, %;

$\beta_{CT}$  – степень сгорания топлива в зоне активного горения;

$Q_n^p$  – теплотворная способность угля;

$Q_{возд}$  – теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/кг;

$Q_{топл}$  – теплота, вносимая в зону активного горения с топливом, МДж/кг;

$(V_c)_r$  – суммарная объемная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, МДж/(кг·°С);

$\varepsilon_r$  – коэффициент теплового излучения топки;

$(\psi F)$  – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую зону активного горения, м<sup>2</sup>;

$B_p$  – расчетный расход угля, кг/ч.

Теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, рассчитывается по выражению [4]:

$$Q_{возд} = \alpha \cdot V_o \cdot C_b \cdot (t_{TB} - t_{XB}) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в топочной камере;  
 $V_0$  – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг угля;  
 $C_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/(м<sup>3</sup>·°C);  
 $t_{ТВ}$  – температура горячего воздуха, подаваемого в горелочные устройства, °C;  
 $t_{ХВ}$  – температура холодного воздуха, равная 30 °C.

Теплота, вносимая в зону активного горения с топливом, определяется как

$$Q_{\text{топл}} = C_{\text{топл}} \cdot t_{\text{топл}}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{топл}}$  – теплоемкость топлива, МДж/(кг·°C);  
 $t_{\text{топл}}$  – температура топлива, °C.

В табл. 1 и 2 приведены компонентный состав высокозольного подмосковного угля и результаты расчетов по содержанию нитрозных газов и полициклических ароматических углеводородов в уходящих газах пылеугольного котла. Табл. 1 представляет химический состав подмосковного угля марки 2Б ОМСШ, перспективного к применению на отечественных электростанциях [5].

Таблица 1

## Компонентный состав подмосковного угля

Месторождение и марка угля (класс или продукт обогащения) / Состав угля на рабочую массу, %							
Подмосковное 2Б ОМСШ ( $Q_H^p = 9,34$ МДж/кг)							
W = 32,0	A = 28,6	S = 2,7	C = 26,0	H = 2,1	O = 8,2	N = 0,4	

Расчетные концентрации бенз(а)пирена и оксидов азота в дымовых газах и характеристики топочного процесса пылеугольного котла приведены в табл. 2. Очистка дымовых газов от токсичных соединений в котельной установке не осуществляется; температура воздуха, подаваемого в топку, составляет 613 К, температура дымовых газов на выходе из зоны активного горения для условий номинальной нагрузки котла равна 2036 К.

Режимные и экологические характеристики, представленные на рис. 1–5, получены на различных относительных нагрузках пылеугольного котла  $\bar{D}$  для следующих условий:

- коэффициент избытка воздуха на выходе из топочной камеры  $\alpha = 1,05–1,35$ ;
- расход угля изменялся в диапазоне 61,95–154,87 кг/с;
- паропроизводительность котла варьировалась в пределах 700–1750 т/ч;
- расход вторичного пара принимал значения 599,2–1498,0 т/ч;
- температура уходящих газов составляла 137 °C;
- объемная теплоемкость продуктов сгорания  $(V_{c,r}) = 1,45 \cdot 10^{-3}$  МДж/(кг·°C);
- коэффициент теплового излучения топки в зоне активного горения  $\epsilon_T = 0,65$ ;
- коэффициент эффективности экранов  $\psi = 0,335$ ;
- потери тепла с механическим недожогом угля равны 1 %;
- КПД котла в номинальном режиме работы составлял 91,13 %.

На рис. 1. представлена зависимость изменения удельного содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котла от коэффициента избытка воздуха на выходе из топочной камеры.

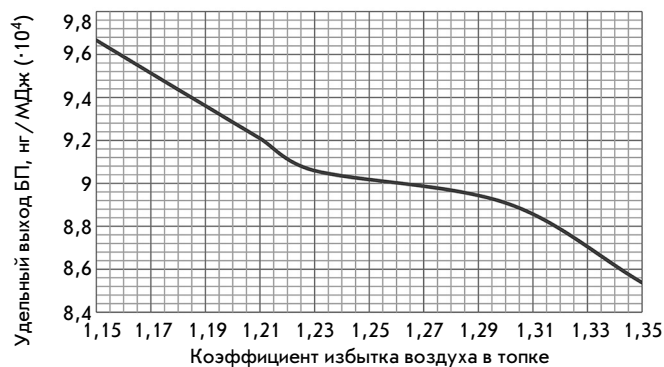


Рис. 1. Зависимость удельного выхода бенз(а)пирена от коэффициента избытка воздуха в уходящих газах

Анализ рис. 1. показывает, что для подмосковного угля в результате повышения коэффициента избытка воздуха в топке с 1,15 до 1,35 удельный выход бенз(а)пирена в уходящих газах уменьшается на 15,4 % и составляет  $8,175 \cdot 10^{-4}$  мг/МДж. Увеличение коэффициента избытка воздуха на 1 % приводит к росту содержания бенз(а)пирена в уходящих газах на 1,04 %. Максимальная концентрация бенз(а)пирена в уходя-

Таблица 2

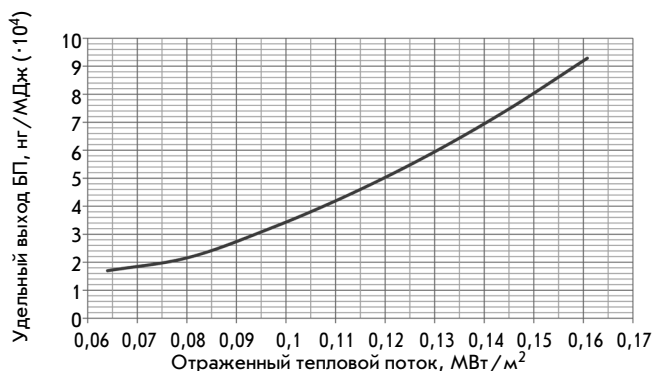
## Эколого-энергетические показатели парового котла

Параметр	Значение параметра для пылеугольного котла (паропроизводительность 486 кг/с)							
	1,15	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25	1,30	1,35
Коэффициент избытка воздуха в топке, $\alpha$	1,15	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25	1,30	1,35
Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах, мг/м <sup>3</sup>	787	763	741	719	698	677	626	583
Концентрация NO <sub>2</sub> в уходящих газах, мг/м <sup>3</sup>	1357	1382	1405	1426	1446	1465	1508	1546
Удельный выход бенз(а)пирена (·10 <sup>4</sup> ), $K_{БП}$ , мг/МДж	9,666	9,513	9,361	9,209	9,059	8,909	8,538	8,175
Удельный выход NO <sub>2</sub> , $K_{NO_2}$ , г/МДж	1,668	1,722	1,775	1,827	1,878	1,928	2,051	2,169
Время пребывания газов в топке, $\tau_{ЗАГ}$ , с	2,550	2,531	2,513	2,490	2,476	2,458	2,415	2,373

щих газах, равная  $787 \text{ нг/м}^3$ , соответствует коэффициенту избытка воздуха в топке  $\alpha = 1,15$ .

В диапазоне  $\alpha = 1,23-1,29$  темп снижения удельно-го выхода бенз(а)пирена замедляется, что связано с установлением в топке равновесной температуры образования полициклических ароматических углеводородов. Дальнейшее повышение избытка воздуха до  $\alpha = 1,35$  приводит к дополнительному уменьшению содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания котла на  $8,6 \%$ .

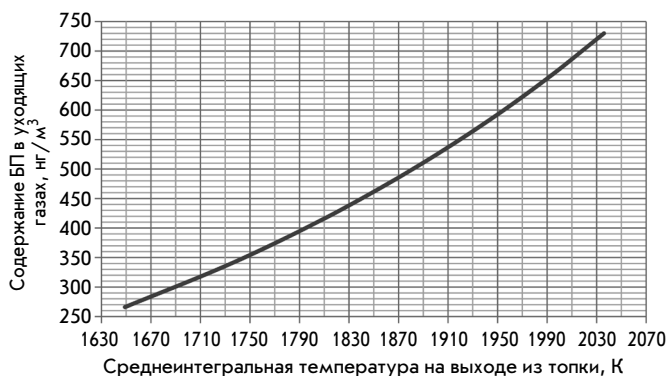
Зависимость влияния отраженного теплового потока в зоне активного горения на удельный выход бенз(а)пирена в продуктах сгорания представлена на рис. 2. Увеличение теплового потока с  $0,064$  до  $0,161 \text{ МВт/м}^2$  способствует росту удельного выхода бенз(а)пирена в  $5,5$  раза.



**Рис. 2. Влияние отраженного теплового потока в зоне активного горения на удельный выход бенз(а)пирена**

Удельный выброс нитрозных газов  $1,801 \text{ г/МДж}$  соответствует концентрации  $\text{NO}_2$  в продуктах сгорания  $1416 \text{ мг/м}^3$  для номинального режима работы котла. Минимальная концентрация оксидов азота  $660 \text{ мг/м}^3$  выявлена для условий относительной паровой нагрузки  $\bar{D} = 0,4$ ,  $\alpha = 1,05$ .

Приведенная на рис. 3. зависимость показывает, что с увеличением среднеинтегральной температуры на выходе из топки котла содержание бенз(а)пирена в уходящих газах возрастает.



**Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в уходящих газах котла в зависимости от среднеинтегральной температуры на выходе из топки**

Изменение температурного уровня в топке котла рассматривалось в пределах роста паровой нагрузки котла с  $0,4D$  до  $D$ . В приведенных условиях концентра-

ция бенз(а)пирена в продуктах сгорания возрастает с  $266$  до  $730 \text{ нг/м}^3$ . Таким образом, повышение температуры в зоне активного горения на  $1 \%$  приводит к повышению содержания бенз(а)пирена в дымовых газах на  $3,35 \%$ .

Отраженный тепловой поток в зоне активного горения котла  $q_{\text{ЗАГ}}^{\text{отр}} = q_{\text{ЗАГ}}(1-\psi)$  позволяет более точно оценивать интенсивность образования вредных выбросов вследствие корректировки температуры на выходе из котла посредством учета эффективности нагрева экранных поверхностей в топочной камере.

Коэффициент, учитывающий эффективность топочных экранов, оценивается по выражению [7]:

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i F_{\text{сти}}}{\sum_{i=1}^n F_{\text{сти}}}, \quad (4)$$

где  $\psi_i$  – коэффициент эффективности нагрева  $i$ -го экрана;

$F_{\text{сти}}$  – поверхность  $i$ -го экрана,  $\text{м}^2$ ;

$\sum_{i=1}^n F_{\text{сти}}$  – суммарная площадь поверхностей, ограничивающих зону активного горения,  $\text{м}^2$ .

Связь адиабатной температуры горения угля и среднеинтегральной температуры на выходе из зоны активного горения выражается формулой:

$$\bar{T}_{\text{ЗАГ}} = T_{\text{ад}} \sqrt[4]{1-\psi}, \quad (5)$$

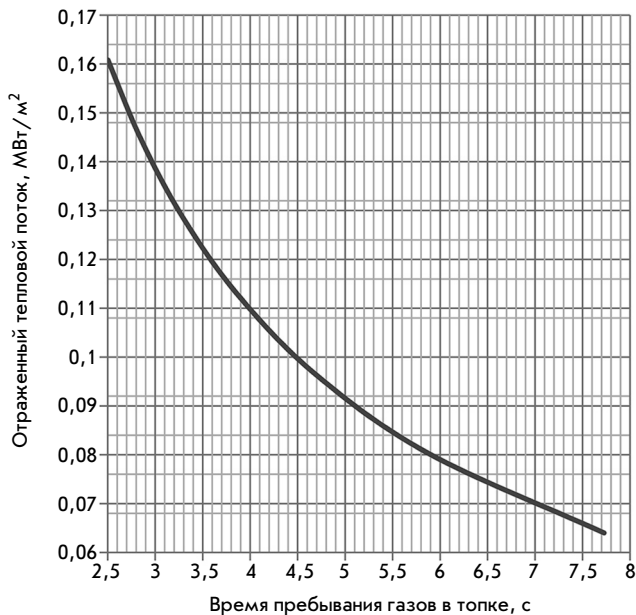
где  $T_{\text{ад}}$  – адиабатная температура горения угля в котле,  $\text{К}$ .

Выражение для расчета содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания угля с учетом влияния коэффициента эффективности нагрева топочных экранов  $\psi$  характеризуется при этом функциональной зависимостью  $C_{\text{БП}} = f(\Theta^4)$ , в которой  $\Theta = \bar{T}_{\text{ЗАГ}} / T_{\text{ад}}$  – безразмерная температура [6–8].

На рис. 4. приведена зависимость влияния отраженного теплового потока в зоне активного горения на время пребывания дымовых газов в топке котла.

Уменьшение значения отраженного теплового потока способствует значительному увеличению времени нахождения уходящих газов в топке, что положительно влияет на сокращение образования нитрозных газов  $\text{NO}_2$ , но при этом повышает содержание полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания вследствие наличия недожога топлива. В рассмотренном диапазоне времени пребывания уходящих газов в зоне активного горения  $t_{\text{ЗАГ}}$  концентрация нитрозных соединений снижается с  $1416$  до  $660 \text{ мг/м}^3$ , что сопровождается уменьшением удельного выхода  $\text{NO}_2$  с  $1,801$  до  $0,840 \text{ г/МДж}$ . Валовый выброс оксидов азота в приведенных условиях работы котельного оборудования сокращается на  $38\,549 \text{ т/год}$ .

Удельный выход бенз(а)пирена в приведенном диапазоне  $q_{\text{ЗАГ}}^{\text{отр}}$  увеличивается от  $1,694 \cdot 10^{-4}$  до  $9,285 \cdot 10^{-4} \text{ нг/МДж}$ . Таким образом, рост количества бенз(а)пирена в продуктах сгорания на  $1 \%$  приводит к уменьшению выхода  $\text{NO}_2$  на  $0,65 \%$ . Отметим, что для



**Рис. 4. Зависимость влияния отраженного теплового потока в зоне активного горения на время пребывания дымовых газов в топке котла**

условий работы котла с нагрузкой 0,4D обеспечивают стабильные условия шлакования золы.

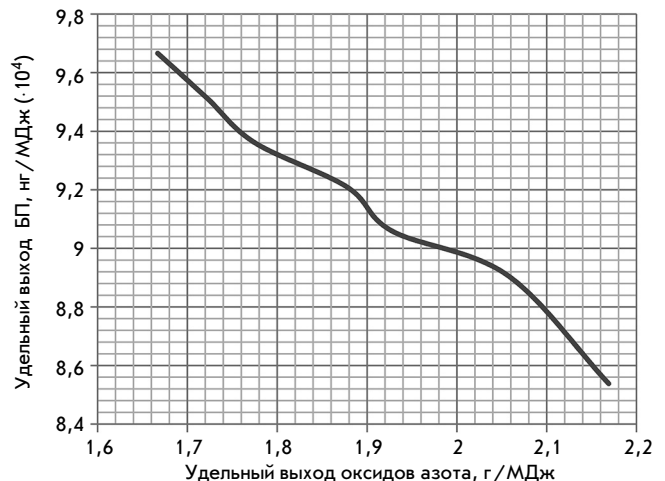
Выход  $\text{NO}_2$  в результате горения угля состоит из термических и воздушных оксидов азота. Установлено, что в случае увеличения коэффициента избытка воздуха в зоне активного горения от 1,15 до 1,35 температура в зоне практически не снижалась, при этом концентрация оксидов азота возросла от 1357 до 1546 мг/м³. Такое увеличение выхода нитрозных газов происходит за счет уменьшения времени пребывания газов в топке с 2,550 до 2,373 секунды и увеличения интенсивности образования воздушных  $\text{NO}_2$ .

Графическая зависимость, приведенная на рис. 5, аппроксимирована полиномом 4-й степени с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,996$  вида

$$K_{\text{БП}} = -30,73(K_{\text{NO}_2})^4 + 222,8(K_{\text{NO}_2})^3 - 602,1(K_{\text{NO}_2})^2 + 716,2K_{\text{NO}_2} - 306,0, \quad (6)$$

где  $K_{\text{NO}_2}$  – удельный выход оксидов азота, г/МДж.

Рост удельного выхода  $\text{NO}_2$  происходит в условиях уменьшения содержания бенз(а)пирена в уходящих газах (рис. 5), что подтверждает наличие конверсионных процессов полициклических ароматических угле-



**Рис. 5. Влияние выхода нитрозных газов на удельное содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания**

водородов в газоходе котла. Приведенная функциональная зависимость  $K_{\text{БП}} = f(K_{\text{NO}_2})$  отображает важнейшую эксплуатационную характеристику паровых энергетических котлов и может применяться для наладки малотоксичных режимов горения углей в энергоустановках генерирующих комплексов.

Таким образом, впервые установлена взаимосвязь между выбросами бенз(а)пирена и температурой на выходе из зоны активного горения, носящая асимптотический характер при увеличении  $T_{\text{ЗАГ}} > 1500$  К. Полученные в результате моделирования параметры топочного процесса характеристики зоны активного горения позволяют находить пути управления технологическими выбросами нитрозных газов и полициклических ароматических углеводородов с учетом обеспечения максимальных технико-экономических показателей и экологических параметров безопасной работы пылеугольного энергоблока. В результате снижения паровой нагрузки котла до 40 % существует некоторый температурный запас для дальнейшего увеличения глубины разгрузки со стабильным обеспечением условий шлакования золы. Вследствие значительных сложностей индикации выбросов канцерогенных соединений от пылеугольных котлов предложен косвенный способ определения выхода бенз(а)пирена, основанный на взаимосвязи с содержанием в продуктах сгорания  $\text{NO}_2$ .

## Литература

1. Чугаева А. Н., Тумановский А. Г., Котлер В. Р. и др. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для предприятий тепловой энергетики // Электрические станции. – 2014. – № 1. – С. 50–55.
2. Brorstrom-Lunden E., Lindskog A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons during simulated stack gas sampling, Environmental Science and Technology, 1985, v. 19, no. 4, pp. 313–316. <https://doi.org/10.1021/es00134a001>.
3. Longwell J. P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. 19<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1982, pp. 1339–1350. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(82\)80310-x](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(82)80310-x).
4. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – СПб., 1998. – 257 с.

5. Липов Ю. М., Самойлов Ю. Ф., Виленский Т. В. Компонировка и тепловой расчет парового котла: уч. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 298 с.: ил.

6. РД 153-34.1-02.316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. – М.: ОАО «ВТИ», 2003.

7. РД 153-34.02.304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. – М.: ОАО «ВТИ», 2003.

#### Toxic substances emission depending on combustion modes on coal-fired power plants

**M. S. Ivanitskiy,**

*The Volzhsk Branch of MPEI, PhD, associate professor*

*Coal-fired power plants require increasing efficiency of coal combustion with implementation of new combustion technologies and emission control. High-efficient toxic gas disposal is tied to increased operational cost of power generation. Inner variable-mode operation is a budget friendly method dealing with temperature adjustments in a combustion zone. A lack of using temperature sensors and control systems on real power plant equipment can still be compensated by combustion processes modeling. The author performs toxic substances emission modeling depending on combustion modes on coal-fired power plants*

**Keywords:** benzo(a)pyrene, coal, modeling, temperature mode, environmental parameters.

### Уважаемые читатели!

В электронной библиотеке Elibrary абсолютно бесплатно можно скачать наши статьи за 2005, 2006 и 2007 гг. Напоминаем, что журнал в то время носил название «Энергобезопасность в документах и фактах». В ранних выпусках вы найдете много полезного, читайте и цитируйте нас в ваших работах! Все остальные выпуски предлагаются к скачиванию по доступным ценам.

#### Как нас найти:

[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) ➡ Каталог журналов ➡ Энергобезопасность и энергосбережение