УДК 621.318.43

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОАГРЕГАТОВ ПРИ НЕЧЕТКИХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Докт. техн. наук СЕВАСТЬЯНОВ П. В., студ. ВЕНБЕРГ А. В.

Могилевский машиностроительный институт

В настоящей статье предложена методика математического моделирования и оптимизации работы энергоагрегатов с учетом того, что параметры моделируемых объектов известны с различной степенью неопределенности.

Рассмотрим постановку задачи применительно к теплоэлектроцентрали, в которой установлено n котлов, k из которых способны работать на жидком топливе или газе, а также на комбинированном топливе в любом сочетании жидкого топлива и газа ($k \le n$). Текущая суммарная паропроизводительность котлов D_K (т/ч) ограничивается сверху планом работы потребителей. Необходимо выбрать режим работы группы котлоагрегатов (их оптимальный состав, паровую нагрузку и доли использования различных видов топлива каждым из них) так, чтобы максимизировать КПД котельной установки. Следует подчеркнуть, что предлагаемый подход позволяет при необходимости поставить задачу исходя из других критериев: минимизация расхода условного топлива, минимизация материальных затрат на используемое топливо [1], минимизация затрат на эксплуатацию (включает затраты на топливо и ремонт).

Опишем математическую формулировку задачи. В качестве исходных данных примем эксплуатационные характеристики и параметры, полученные при режимно-наладочных испытаниях и в процессе эксплуатации данных агрегатов, а также характеристики используемого топлива, условия эксплуатации и другие необходимые для расчетов параметры. Сформулируем целевую функцию. КПД котельной установки $\eta^{\text{бр}}_{\text{КУ}}$ определяется как средневзвешенная величина КПД всех агрегатов

$$\eta^{\text{бр}}_{\text{КУ}}(\{D_{\text{К}}\}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \eta^{\text{бр}}_{\text{К}i}(D_{\text{К}i}) Q^{\text{бр}}_{\text{К}i}(D_{\text{К}i})}{\sum_{i=1}^{n} Q^{\text{бр}}_{\text{К}i}(D_{\text{К}i})} \to \max, \qquad (1)$$

где $\{D_{\text{К}}\} = \{D_{\text{К}1}, D_{\text{К}2}, ..., D_{\text{К}n}\}$ — вектор паропроизводительностей всех n агрегатов;

$\eta^{\text{бр}}_{\text{К}i}(D_{\text{К}i})$ — КПД i-го агрегата (независимо от используемого топлива);

$Q^{\text{бр}}_{\text{К}i}(D_{\text{К}i})$ — теплопроизводительность i-го агрегата.

Связь тепло- и паропроизводительности выражается следующим соотношением:

$$Q^{\text{бр}}_{\text{К}}(D_{\text{К}}) = D_{\text{К}}\,(i_{\text{пе}} - i_{\text{пв}}) + G_{\text{н.пр}}\,(i_{\text{кв}} - i_{\text{пв}}), \qquad (2)$$

где $G_{\text{н.пр}} = 0{,}01\ D_{\text{К}}$ — расход воды на непрерывную продувку т/ч;

$i_{пе}$ – энтальпия перегретого пара (при давлении $p_{пе}$ = 110 кгс/см^2 и температуре $t_{пе}$ = 535 °С имеем $i_{пе}$ = 825,05 ккал/кг);

$i_{пв}$ – энтальпия питательной воды (при давлении $p_{пе}$ = 180 кгс/см^2 и температуре $t_{пе}$ = 230 °С имеем $i_{пв}$ = 237,4 ккал/кг);

$i_{кв}$ – энтальпия котловой воды, ккал/кг (энтальпия определяется по [2] в зависимости от давления и температуры воды в барабане, которые фиксируются при режимно-наладочных испытаниях).

Как указывалось выше, котлоагрегаты могут потреблять комбинированное топливо (мазут и газ). Режимно-наладочные испытания котлов [3, 4] показали, что разные виды топлива с некоторой степенью приближения могут комбинироваться аддитивным образом, т. е. для любого значения паровой нагрузки D_{Ki} справедливо следующее равенство:

$$\eta_{Ki}^{бр}(D_{Ki}) = \lambda_i \eta_{Ki/м}^{бр}(D_{Ki}) + (1-\lambda_i)\eta_{Ki/г}^{бр}(D_{Ki}), \tag{3}$$

где $\eta_{Ki/м}^{бр}(D_{Ki})$, $\eta_{Ki/м}^{бр}(D_{Ki})$ – КПД i-го агрегата при работе на мазуте и газе соответственно (для расчетов КПД использовались общепринятые методики [5, 6], которые ввиду их громоздкости здесь не приводятся);

λ_i характеризует доли использования разных видов топлива i-м котлом;

$$0 \le \lambda_i \le 1. \tag{4}$$

В результате целевая функция (1) примет вид

$$\eta_{КУ}^{бр}(\{D_K\},\{\lambda\}) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\lambda_i \eta_{Ki/м}^{бр}(D_{Ki}) + (1-\lambda_i)\eta_{Ki/г}^{бр}(D_{Ki})\right)Q_{Ki}^{бр}(D_{Ki})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{Ki}^{бр}(D_{Ki})} \to \max, \tag{5}$$

где $\{\lambda\} = \{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\}$ – вектор, характеризующий доли использования разных видов топлива всеми n агрегатами.

Кроме условий (4), накладываются ограничения на суммарную паропроизводительность

$$\sum_{i=1}^{n} D_{Ki} = D_K \tag{6}$$

и диапазоны рабочей паропроизводительности для каждого котла

$$D_{Ki/\min} \le D_{Ki} \le D_{Ki/\max}, \quad i = 1, ..., n. \tag{7}$$

Таким образом, в энергетических характеристиках котлов в зависимости от конструкции оборудования, сжигаемого топлива, условий эксплуатации должны быть учтены следующие внешние факторы и параметры процесса:

вид, марка и характеристика сжигаемого топлива (низшая теплота сгорания $Q_н^р$ (ккал/кг (кДж/кг) или ккал/м^3 (кДж/ м^3)), влажность на рабочую массу $W_р$ (%));

температура мазута, подаваемого в котел, $t_{тл}$, °С;

температура холодного воздуха $t_{\text{хв}}$, °С;

теплосодержание котловой воды $i_{\text{кв}}$, ккал/кг (кДж/кг);

теплосодержание перегретого $i_{\text{пе}}$ пара и питательной воды $i_{\text{пв}}$, ккал/кг (кДж/кг);

температура воздуха после калориферов $t''_{\text{кф}}$, °С;

температура уходящих газов $t_{\text{ух}}$, °С;

коэффициент избытка воздуха в режимном сечении $\alpha_{\text{рс}}$;

присосы воздуха в газовый тракт $\Delta\alpha$ и в топку $\Delta\alpha^{\text{т}}$;

потеря теплоты с химическим недожогом топлива q_3, %;

значения других внешних факторов, присущих индивидуальным особенностям установок и влияющих на экономичность работы котла.

В процессе решения данной задачи необходимо определить $(n-1 + k)$ переменных: k переменных $-\lambda_i$, $i = 1, ..., k$; $(n-1)$ переменных $-$ $D_{\text{К}i}$, $i = 1, ..., (n-1)$.

$D_{\text{К}n}$ определяется из соотношения $D_{\text{К}n} = D_{\text{К}} - \sum_{i=1}^{n-1} D_{\text{К}i}$.

Одной из проблем моделирования работы энергоагрегатов является относительно быстрое изменение их состояния в процессе эксплуатации, в то время как испытания, в процессе которых по нескольким контрольным точкам на всем рабочем диапазоне нагрузок определяются требуемые величины, являются трудоемкими и дорогостоящими и проводятся относительно редко. При подобных испытаниях определяются изменения теплосодержания котловой воды, температуры воздуха после калориферов и уходящих газов, а также коэффициента избытка воздуха в режимном сечении $\alpha_{\text{рс}}$ в зависимости от изменений паропроизводительностей котлоагрегатов. Данные зависимости утверждаются как нормативные и являются базовыми при построении модели. В последней они были представлены в виде регрессионных полиномов 3-й степени, полученных в результате статистического анализа данных испытаний:

$$\alpha_{\text{рс}i} = a_0^i + a_1^i D_{\text{К}i} + a_2^i D_{\text{К}i}^2 + a_3^i D_{\text{К}i}^3 . \qquad (8)$$

Таким образом, предлагаемая модель во многом основана на результатах статистического анализа данных, полученных при натурных испытаниях и в процессе эксплуатации агрегатов.

В связи с этим возникает проблема учета неопределенности исходных данных, связанной со статистическим характером коэффициентов регрессионных полиномов, а также с погрешностью приборов и др. Игнорирование объективно существующих неопределенностей зачастую приводит к результатам расчетов, весьма далеким от реальности, что делает их неприменимыми на практике.

Обычно при расчетах недостаточно точно известные параметры просто заменяются их средними значениями. Однако при таком подходе происходит потеря весьма полезной информации. Получив на выходе конкретное число, которое является, предположительно, некоторым средним (наиболее вероятным) значением исследуемого параметра, мы абсолютно ничего не можем сказать о возможных пределах варьирования результата. В нашем случае часть параметров модели известна неточно: с достаточной определенностью можно указать лишь диапазоны их возможных и наиболее вероятных значений. Кроме того, известно, что коэффициенты регрессионных полиномов выше первой степени (типа (8)) являются случайными величинами, распределенными в лучшем случае по нормальному закону. Таким образом, задача усложняется наличием неопределенностей различного типа и информативности.

Выходом из положения является использование элементов нечетко-интервальной математики, обобщающей обычный интервальный подход [7] и позволяющей трансформировать частотные распределения в нечеткие интервалы с минимальной потерей информации.

В [8] показано, что коренное отличие частотного распределения от функции принадлежности заключается в степени информативности. Так, для задания частотного распределения $f(x)$ требуется, чтобы для каждых двух значений a и b была известна величина отношения $f(a)/f(b)$, в то время как для математической формализации функции принадлежности $\mu(x)$ достаточно качественной информации о том, что, например, значение a более возможно (реализуемо, допустимо, вероятно), чем b. Следует отметить, что именно снижение требований к информативности позволяет существенно расширить конструктивные возможности теории нечетких множеств, в частности, сравнительно просто построить арифметику, оперирующую с нечеткими интервалами.

Поэтому на практике во многих случаях бывает целесообразно даже пожертвовать точностью имеющихся частотных распределений, трансформируя их в нечеткие интервалы с целью получения модели, позволяющей быстро и эффективно решить поставленную задачу. При этом желательно в процессе трансформации сохранить как можно больше информации, характеризующей исходные неопределенности. На рис. 1 схематически показан используемый нами способ такой трансформации, сохраняющий количественную информацию о размерах и расположении на оси доверительных интервалов и качественную информацию о вероятностях. Ясно, что чем гуще сетка α-уровней, тем точнее результат трансформации.

Таким образом, при применении нечетко-интервального подхода в качестве результата мы получаем нечеткий интервал. Как правило этого вполне достаточно для принятия решения.

В простейшем случае трапецеидального (четырехреперного) представления нечетких интервалов в соответст-

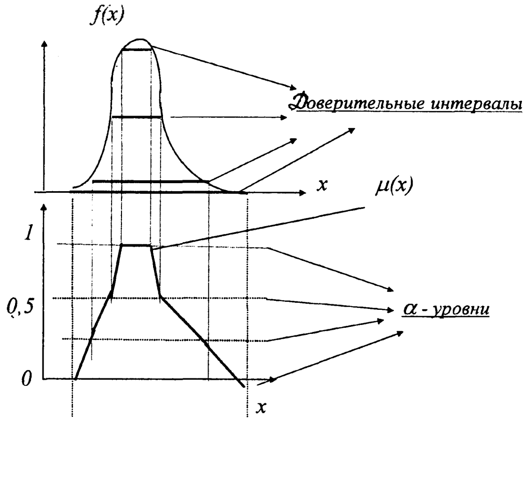

Рис. 1

вии с принципом расширения Л. Заде регрессионные зависимости типа (8) заменяются их нечетко-интервальными аналогами

$$[F_1(x),\ F_2(x),\ F_3(x),\ F_4(x)] = [a_{01},\ a_{02},\ a_{03},\ a_{04}] +$$

$$+ [a_{11},\ a_{12},\ a_{13},\ a_{14}]\ x + [a_{21},\ a_{22},\ a_{23},\ a_{24}]\ x^2 +$$

$$+ [a_{31},\ a_{32},\ a_{33},\ a_{34}]\ x^3, \qquad (9)$$

где $F_1(x)$, $F_4(x)$, a_{i1}, a_{i4}, $i = 0 \ldots 3$ – верхние и нижние границы интервалов возможных значений;

$F_2(x)$, $F_3(x)$, a_{i2}, a_{i3}, $i = 0 \ldots 3$ – верхние и нижние границы интервалов наиболее вероятных значений.

Аналогично представляются и другие нечеткие параметры, а также и целевая функция (5)

$$[\eta^{\text{бр}}_{\text{КУ}1} \ldots \eta^{\text{бр}}_{\text{КУ}4}] =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\lambda_i [\eta^{\text{бр}}_{\text{К}i/\text{м}1} \ldots \eta^{\text{бр}}_{\text{К}i/\text{м}4}] + (1-\lambda_i)[\eta^{\text{бр}}_{\text{К}i/\text{г}1} \ldots \eta^{\text{бр}}_{\text{К}i/\text{г}4}]\right) [Q^{\text{бр}}_{Ki1} \cdots Q^{\text{бр}}_{\text{К}i4}]}{\sum_{i=1}^{n} [Q^{\text{бр}}_{\text{К}i1} \cdots Q^{\text{бр}}_{\text{К}i4}]}.$$

Таким образом, задача заключается в минимизации нечетко-интервальной целевой функции при наличии нечетко-интервальных ограничений. Для ее решения необходимо воспользоваться правилами нечетко-интервальной арифметики.

Выполнение операций над нечетко-интервальными числами сводится к выполнению операций над их α-уровнями. Рассмотрим этот механизм на примере сложения. Пусть существуют нечеткие интервалы A и B, тогда нечеткий интервал C, равный их сумме, можно найти по формуле

$$C = A + B = \bigcup_{\alpha} C_\alpha = \bigcup_{\alpha} (A_\alpha + B_\alpha), \qquad (10)$$

где C_α, A_α, B_α – α-уровни нечетких интервалов C, A и B соответственно, т. е. четкие интервалы с одинаковыми значениями функции принадлежности нечеткому интервалу; $\bigcup_{\alpha}$ – знак объединения по α-уровням.

Операции вычитания, деления и умножения над нечеткими интервалами выполняются аналогично. В настоящее время существует несколько вариантов интервальной арифметики [9]. В наиболее распространенном из них соответствующие арифметические операции над четкими интервалами $A = [A_1, A_2]$ и $B = [B_1, B_2]$ выполняются следующим образом:

$$A + B = [A_1 + B_1,\ A_2 + B_2];\quad A - B = [A_1 - B_2,\ A_2 - B_1];$$

$$AB = [\min(A_1B_1,\ A_2B_2,\ A_1\ B_2,\ A_2B_1);$$

$$\max(A_1\ B_1,\ A_2\ B_2,\ A_1\ B_2,\ A_2\ B_1)];$$

$$A/B = [A_1,\ A_2]\ [1/B_2,\ 1/B_1].$$

В процессе поиска оптимума на каждом шаге необходимо сравнивать текущее значение нечетко-интервальной целевой функции с наиболее оптимальным из найденных на предыдущем шаге, а также при наличии ограничений необходимо проверять решение на допустимость. При этом встает проблема сравнения нечетких интервалов. Ясно, что сравнение интервалов по их средним значениям не обеспечит адекватных результатов, если интервалы взаимно перекрываются, особенно при проверке ограничений. Сравнение интервалов только по их ширине также может приводить к абсурдным результатам.

Поэтому сравнение нечетких интервалов осуществлялось на основе сопоставления их α-уровней (рис. 2), на каждом из которых мы имеем по два четких интервала, сравниваемых между собой по правилам сравнения четких интервалов. Последние разработаны на основе теоретико-

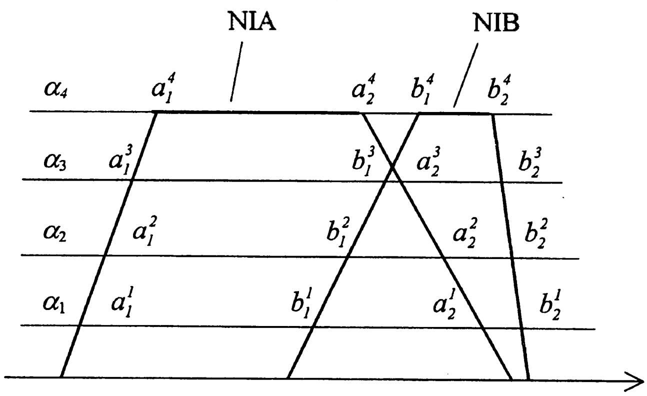

Рис. 2

вероятностного подхода к распределению случайных величин и позволяют определить, с какой вероятностью один из четких интервалов больше (меньше) другого [7]. Вероятности, полученные на каждом уровне, умножаются на соответствующий вес и суммируются. В качестве весов-соизмерителей выступает следующая величина:

$$x_i = \frac{i}{\sum_{1}^{n} i}, \tag{11}$$

где i — номер уровня; n — число уровней.

В данном случае (рис. 2) интервал разбит на 4 α-уровня. Таким образом, мы имеем интервалы $NIA^1(a_1^1,\ a_2^1)$ и $NIB^1(b_1^1,\ b_2^1)$ на первом уровне; $NIA^2(a_1^2,\ a_2^2)$ и $NIB^2(b_1^2,\ b_2^2)$ — на втором; $NIA^3(a_1^3,\ a_2^3)$ и $NIB^3(b_1^3,\ b_2^3)$ — на третьем; $NIA^4(a_1^4,\ a_2^4)$ и $NIB^4(b_1^4,\ b_2^4)$ — на четвертом. Исходя из этого правило сравнения нечетких интервалов можно выразить следующей формулой:

$$P(NIB > NIA) = \sum_{i=1}^{n} P(NIB^i > NIA^i)x_i\,, \tag{12}$$

где $P(NIB^i > NIA^i)$ – вероятности того, что $NIB > NIB$ на i-м уровне.

Разработанная методика реализована в специализированном программном обеспечении, разработанном в интегрированной среде C++Builder с применением методики объектно-ориентированного программирования, для решения задачи математического моделирования и оптимизации технико-экономических параметров работы энергоагрегатов при нечетко-интервальной неопределенности исходных данных. В качестве алгоритма оптимизации использовался метод случайного поиска «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала». По желанию заказчика данное ПО осуществляет поиск режимов работы котлоагрегатов с целью максимизации КПД котельной установки, но можно реализовать и другие целевые функции: минимизация расхода условного топлива, минимизация материальных затрат на используемое топливо, минимизация затрат на эксплуатацию (включает затраты на топливо и ремонт).

На рис. 3 дано диалоговое окно ввода параметров, характеризующих фактическое состояние котлов, представленных в виде нечетких интервалов. При нажатии соответствующей кнопки ввод данных можно произвести с одновременной их графической визуализацией и необходимыми пояснениями (рис. 4).

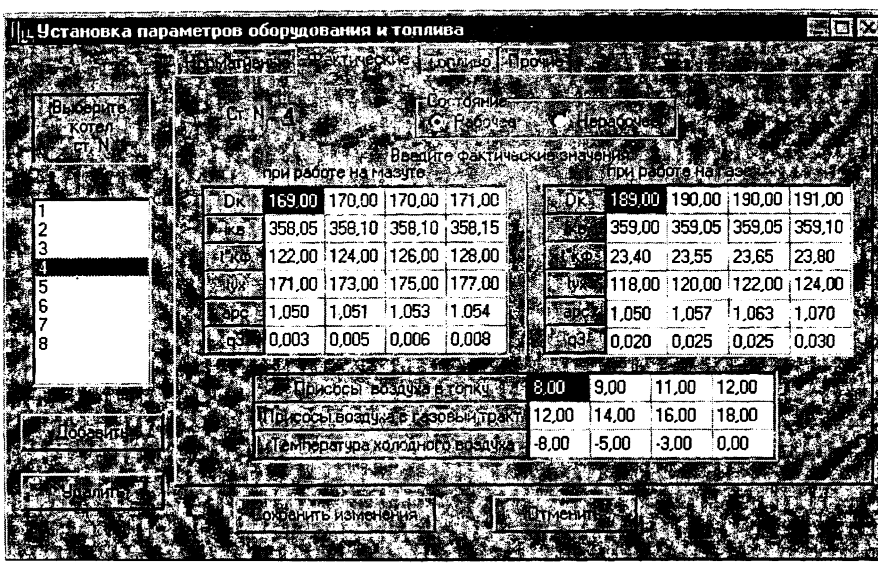

Рис. 3. Ввод нечетко-интервально заданных исходных данных

В результате оптимизации оптимальный КПД будет получен в нечетко-интервальной форме, по которой можно будет судить о возможных и наиболее вероятных значениях, а также соответственно вычислять диапазон возможного расхода топлива и другие величины.

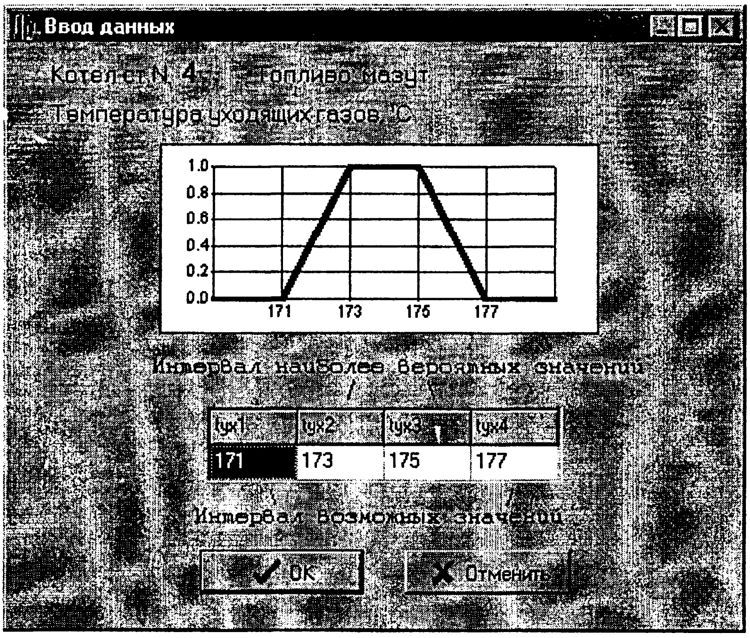

Рис. 4

ВЫВОДЫ

1. Разработанные методика математического моделирования и оптимизации в условиях неопределенности и специализированное программное обеспечение позволяют адекватно описывать теплоэнергетические процессы и при решении задачи оптимизации режимов работы энергоагрегатов получать результаты, больше соответствующие реальной ситуации, чем при использовании традиционных подходов.

2. Предложенная методика минимизации нечетко-интервально заданных функций обеспечивает уменьшение как среднеинтервальных значений, так и ширины интервала по мере продвижения к минимуму, т. е. позволяет получать не только наиболее эффективные, но и наиболее устойчивые решения.

3. Разработанные математические модели и методика оптимизации имеют достаточно общий характер и могут быть применены для совершенствования работы широкого спектра энергетических установок в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Севастьянов П. В., Парков Н. Ф., Венберг А. В. Экономико-математическая модель и оптимизация режимов паросиловых установок, работающих на комбинированном топливе // Энергоэффективность. – 1998. – № 12. – С. 8–9.

2. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.

3. Могилевская ТЭЦ-2. Заключение по режимно-наладочным испытаниям котла ТГМ-84/Б ст. № 7 при совместном сжигании природного газа и мазута. – Мн.: ОАО «Белэнергоремналадка», 1997. – 15 с.

4. Могилевская ТЭЦ-2. Заключение по режимно-наладочным испытаниям котла ТГМ-84/Б ст. № 8 при совместном сжигании природного газа и мазута. – Мн.: ОАО «Белэнергоремналадка», 1997. – 14 с.

5. М е т о д и ч е с к и е указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. РД 34.09.155-93 / Министерство топлива и энергетики РФ. – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993. – 158 с.

6. М е т о д и ч е с к и е указания по составлению отчета электростанции и АО энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. РД 34.08.552-93 / Министерство топлива и энергетики РФ. – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1993. – 124 с.

7. С е в а с т ь я н о в П. В., В е н б е р г А. В. Моделирование и оптимизация работы энергоагрегатов при интервальной неопределенности // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – № 3. – С. 66–70.

8. Y a g e r R. A foundation for a theory of possibility // J. Of Cybernetics. – 1980. – Vol. 10. – № 1–3. – P. 177–209.

9. К а л м ы к о в С. А., Ш о к и н Ю. И., Ю л д а ш е в З. Х. Методы интервального анализа. – Новосибирск: Наука, 1986. – 223 с.

Представлена кафедрой
экономической информатики

Поступила 27.04.1999

УДК 622.691.24

ГАЗОХРАНИЛИЩА – НАДЕЖНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БЕЛАРУСИ

Канд. геолого-минералог. наук ЦАЛКО П. Б.

Институт геологических наук НАН Беларуси

Один из ключевых вопросов сегодняшнего дня – надежность газоснабжения Беларуси. Растущее использование газа крупными промышленными центрами, такими как Минск, Гомель, Брест, Гродно, Витебск, Могилев и другими, а также сельской местностью создает сезонную неравномерность его потребления. При отсутствии собственных энергоносителей для Беларуси особое значение приобретает создание подземных хранилищ газа (ПХГ). Они создаются в недрах земной поверхности: в природных структурах, аналогичных газовым месторождениям, в истощенных газовых месторождениях, а также в создаваемых емкостях соляных пластов путем выщелачивания водой. Решение о создании ПХГ диктуется экономическими факторами, желанием удовлетворить потребителя во все сезоны года, дни месяца, часы суток, компенсировать снижение поставок газа из ближнего зарубежья из-за неплатежей и снять неудобства при авариях на газопроводах, дать время на их ремонт. Газ заменяет такие виды энергоносителей, как мазут, уголь, дрова, торф, атомная энергия. И с точки зрения охраны окружающей среды – это самое «чистое» топливо.

Первые ПХГ появились в 1916–1920 гг. в США, где их насчитывается свыше 390. В Западной Европе также находится большое количество ПХГ. После распада СССР и единой системы газоснабжения в России насчитывается 22 ПХГ, на Украине – 16, и в то же время продолжается активный поиск объектов, благоприятных для создания ПХГ. В Латвии под Ригой на территории национального парка «Гауя» создано и дейст-