

## МЕТОД РАСЧЕТА НОРМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*А.А. Басалаев, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер*

Рассматривается метод расчета норм потребления технической воды для производственных подразделений металлургических предприятий. Предложенный метод включает в себя построение статистической зависимости удельного потребления технической воды от объема произведенной продукции с учетом классификации данных по сортаменту произведенной продукции и режимам работы оборудования. Для оценки методической погрешности расчета норм потребления воды используется метод кросс-валидации. Представлен пример расчета норм потребления технической воды для рудообогатительной фабрики металлургического предприятия.

*Ключевые слова:* энергетическая эффективность, нормирование, потребление воды, техническая вода, металлургия.

### **Введение**

Важным направлением производственного планирования на металлургическом предприятии является нормирование потребления ресурсов. При этом одним из основных ресурсов, потребление которых необходимо планировать, является техническая вода.

Расчет норм потребления технической воды может производиться с использованием физических моделей [1, 2]. Однако для сложных производств [3, 4] могут отсутствовать как достоверные данные о потреблении воды, так и данные о факторах, которые влияют на потребление воды. Все это значительно усложняет построение физических моделей потребления технической воды.

В этом случае целесообразно использовать статистические методы [5]. Отметим, что задача нормирования потребления технической воды может решаться с применением общих статистических подходов, используемых, например, для нормирования потребления электроэнергии [6–9]. Однако наличие большого количества факторов, влияющих на потребление технической воды, приводит к увеличению статистической погрешности расчета норм при появлении новых данных о потреблении воды. При этом в многофакторных статистических моделях влияние добавления новых данных о потреблении воды учитывается слабо. Поэтому необходимо разработать метод расчета норм и анализа потребления технической воды с учетом технологических допусков и методических погрешностей статистического подхода.

### **Метод расчета норм потребления технической воды**

Исходными данными для решения задачи расчета норм и анализа потребления технической воды являются:

- 1) базовый период – помесечные, посуточные или почасовые значения производства продукции и потребления технической воды за предыдущие несколько суток, месяцев или лет;
- 2) отчетный период – последние данные по производству продукции и потреблению технической воды (показания за последний час, сутки или месяц).

Задачу анализа потребления технической воды сформулируем следующим образом:

- 1) определить нормативную границу потребления технической воды с указанием технологического допуска;
- 2) определить величину перерасхода или экономии, если перерасход или экономия были выявлены.

В основу метода примем подход к нормированию, описанный в [9], согласно которому нормируется удельное потребление ресурса по функции вида:

$$g = \exp(a_0 + a_1 P), \quad (1)$$

где  $g$  – удельное потребление ресурса на единицу продукции;  $P$  – произведенная продукция;  $a_0$  и  $a_1$  – коэффициенты, рассчитываемые в регрессионной модели.

Чтобы учесть при расчете норм различные параметры производственного процесса, свойствам определенному сортаменту продукции, произведем классификацию данных о потребле-

нии технической воды и соответствующем объеме произведенной продукции по сортаменту. Если разделение продукции по сортаменту отсутствует, то рассматривается частный случай, когда есть только один сортамент продукции.

При этом для каждого сортамента на основании технических характеристик оборудования произведем разделение данных на режимы работы: простой оборудования, нормальный режим работы, аварийный режим, перегрузка оборудования. Режим простоя оборудования характеризуется сверхнизким значением произведенной продукции в период его функционирования. Режим перегрузки оборудования определяется по оперативным журналам использования технологического оборудования, которые фиксируют перегрев или сверхнормативный износ компонентов оборудования. Аварийный режим работы также определяется по оперативным журналам и может быть связан со сбросом или утечками воды из системы водоснабжения.

Далее будем рассчитывать нормы удельного потребления воды для каждого сортамента по данным, полученным при нормальном режиме работы оборудования, чтобы исключить влияние выбросов, связанных с известными неисправностями и неэффективными режимами работы.

При расчете норм потребления ресурсов необходимо выявить наиболее эффективные режимы производственного процесса. Для этого воспользуемся методикой, описанной в [10], в которой для нахождения эффективных параметров производственного процесса используется метод взвешенных наименьших квадратов.

Чтобы рассчитать коэффициенты  $a_{n0}$  и  $a_{n1}$  эффективной характеристики (1) с использованием метода взвешенных наименьших квадратов прологарифмируем обе части характеристики (1) и, соответственно, значения удельного потребления воды:

$$\ln(g) = a_{n0} + a_{n1}P. \quad (2)$$

При этом для расчета веса  $\alpha_j$   $j$ -го значения используем выражение

$$\alpha_j = \exp(-de_j), \quad (3)$$

где  $d$  – коэффициент, определяющий скорость убывания веса ( $d > 0$ ), а  $e_j$  – отклонение фактического  $j$ -го значения от нормативного, определяемое по формуле

$$e_j = \ln(g_j) - (a_{n0} + a_{n1}P_j). \quad (4)$$

В соответствии с выражением (3) вес наблюдений с меньшим значением удельного потребления воды будет выше. Таким образом, применив итерационный подход, описанный в [10], найдем параметры  $a_{n0}$  и  $a_{n1}$  характеристики (2) для режима с минимальными значениями удельного потребления воды.

Чтобы снизить влияние неэффективных режимов при нахождении параметров эффективной характеристики, перед расчетом отфильтруем показания с удельными значениями потребления воды, которые превышают значения, описываемые усредненной характеристикой

$$g = \exp(a_{a0} + a_{a1}P). \quad (5)$$

Прологарифмируем обе части характеристики (5) и, соответственно, значения удельного потребления воды. Получим зависимость

$$\ln(g) = a_{a0} + a_{a1}P, \quad (6)$$

Далее для зависимости (6) рассчитаем коэффициенты  $a_{a0}$  и  $a_{a1}$  методом наименьших квадратов.

Поскольку при использовании выражения (3) для нахождения весов  $\alpha_j$  значительное влияние на коэффициенты эффективной характеристики оказывают показания с меньшим удельным потреблением воды, то необходимо оценить степень влияния добавления в выборку новых эффективных или неэффективных показаний. Для этого используем метод кросс-валидации [11].

Случайным образом разобьем выборку отфильтрованных данных базового периода на подмножества, содержащие столько же значений, сколько значений содержится в отчетном периоде. Согласно исходным данным задачи в отчетном периоде содержится 1 значение, поэтому подмножеств и, соответственно, шагов кросс-валидации будет столько же, сколько значений в базовом периоде. Далее поочередно для каждого  $k$ -го подмножества выполним следующие операции:

1. Исключим из выборки данных базового периода  $k$ -е подмножество. Исключенное подмножество будем считать тестовым. Совокупность оставшихся значений будем считать обучающим подмножеством.

2. Для данных обучающего подмножества рассчитаем коэффициенты  $a_{n0k}$  и  $a_{n1k}$  эффективной характеристики (1) методом взвешенных наименьших квадратов.

3. Используя выражение (2), рассчитаем логарифм значения удельного потребления воды для данных о произведенной продукции из тестовой выборки.

Выполнив все шаги кросс-валидации, получим результирующую тестовую выборку логарифмов значений удельного потребления, равную по количеству значений выборке базового периода.

Далее рассчитаем погрешность построения эффективной характеристики. Для этого выполним следующие шаги:

1. Рассчитаем несмещенную среднеквадратическую ошибку RMSE разности логарифмов значений эффективных характеристик выборки базового периода  $x_i^n$  и результирующей тестовой выборки  $x_i^t$  по формуле

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^n - x_i^t)^2}{N-1}}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество значений в отфильтрованной базовой выборке.

2. Определим табличное значение коэффициента Стьюдента  $t$  для выборки из  $N$  значений базового периода.

3. Рассчитаем погрешность построения эффективной характеристики удельного потребления  $\Delta_n$  по формуле

$$\Delta_n = \text{RMSE} \cdot t. \quad (8)$$

Таким образом, эффективная характеристика с учетом погрешности ее построения будет следующей:

$$g = \exp(a_{n0} + a_{n1}P \pm \Delta_n). \quad (9)$$

Также возможно расширить полученный интервал значений нормы экспертной оценкой погрешности измерения удельного потребления воды  $\Delta_e$ . Соответственно, эффективная характеристика будет следующей:

$$g = \exp(a_{n0} + a_{n1}P \pm \Delta_n) \pm \Delta_e. \quad (10)$$

Таким образом, если значение фактического удельного потребления было внутри нормативного диапазона

$$[\exp(a_{n0} + a_{n1}P - \Delta_n) - \Delta_e; \exp(a_{n0} + a_{n1}P + \Delta_n) + \Delta_e], \quad (11)$$

то техническая вода расходовалась в допустимом от нормативного значения диапазоне. Если значение фактического удельного потребления в отчетном периоде превышает верхнюю границу диапазона (11), то фиксируется перерасход технической воды. Если значение фактического удельного потребления меньше нижней границы диапазона (11), то фиксируется экономия технической воды.

При этом эффективная характеристика (1) считается нормой удельного потребления технической воды, а диапазон (11) – нормативным диапазоном допустимого отклонения от нормы удельного потребления.

Далее для каждого сортамента продукции в зависимости от наличия перерасхода или экономии технической воды при нормальном режиме работы оборудования в отчетном периоде определяется один из следующих показателей:

1. Величина перерасхода технической воды  $G_{over}$ :

$$G_{over} = G - P(\exp(a_{n0} + a_{n1}P + \Delta_n) + \Delta_e). \quad (12)$$

2. Величина экономии технической воды  $G_{eco}$ :

$$G_{eco} = P(\exp(a_{n0} + a_{n1}P - \Delta_n) - \Delta_e) - G. \quad (13)$$

В (12) и (13)  $G$  и  $P$  – расход технической воды и суммарное производство продукции в отчетном периоде соответствующего сортамента.

Далее рассмотрим алгоритм автоматизации расчета норм потребления технической воды.

### Автоматизация расчета норм потребления технической воды

На рис. 1 представлена функциональная структура одного цикла процесса автоматизированного расчета норм потребления технической воды, в которой применяется описанный алгоритм.

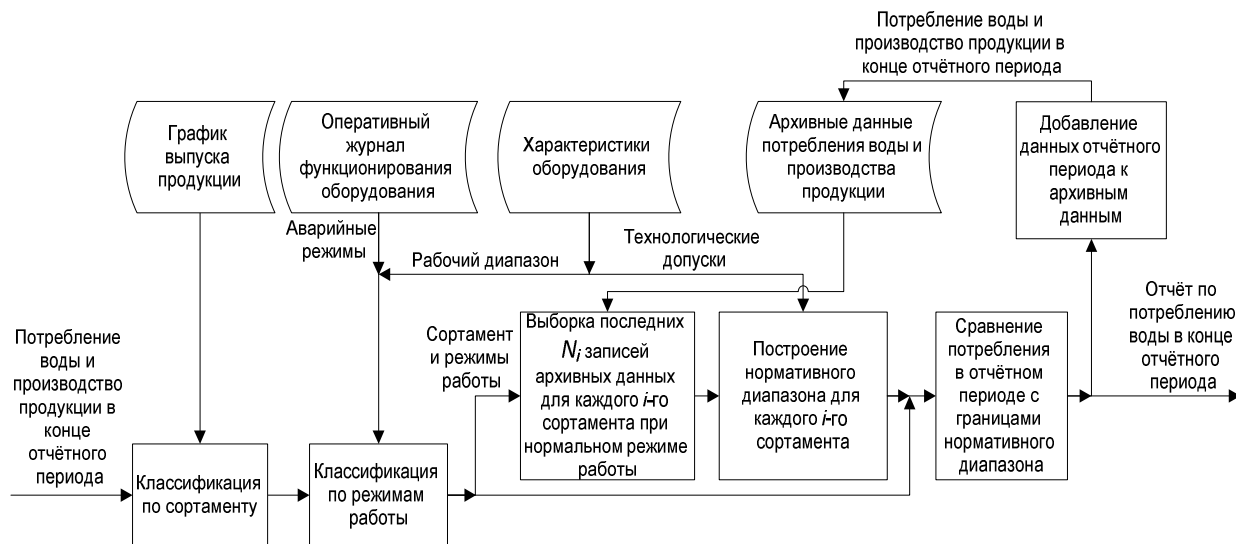


Рис. 1. Цикл процесса автоматизированного расчета норм потребления воды

Для ускорения расчета перед активацией процесса требуется классифицировать архивные данные о потреблении воды и объеме произведенной продукции по сортаменту на основании графика выпуска продукции и по режимам работы оборудования на основании оперативного журнала функционирования оборудования и характеристик самого оборудования.

Рассмотрим один цикл расчета:

1. При поступлении новых данных отчетного периода производится их классификация по сортаменту и по режимам работы оборудования на той же основе, которая применялась при классификации архивных данных.

2. В соответствии с данными о сортаменте и режимах работы производится выборка из архива данных последних  $N_i$  записей о потреблении воды и объеме произведенной продукции для  $i$ -го сортамента для нормального режима работы. Число  $N_i$  принимается равным количеству архивных данных  $i$ -го сортамента в момент введения в эксплуатацию системы, использующей описанный метод.

3. Для каждого  $i$ -го сортамента на выбранных данных строится нормативный диапазон потребления воды (11) с учетом технологических допусков и методической погрешности.

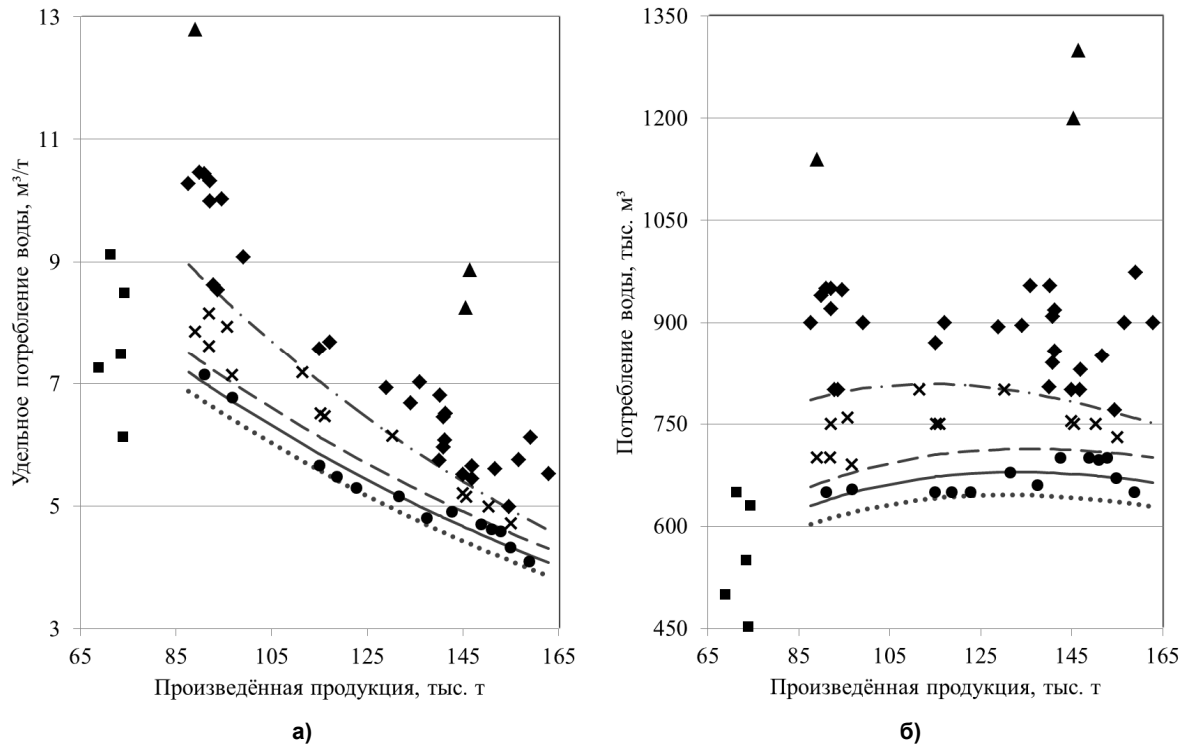
4. Производится сравнение фактического потребления воды в отчетном периоде с границами нормативного диапазона потребления воды (11).

5. После сравнения классифицированные по сортаменту и режимам работы данные отчетного периода добавляются в архив данных.

6. Результаты анализа потребления воды в отчетном периоде предоставляются в требуемой отчетной форме.

### Пример

Рассмотрим пример применения предложенного метода расчета норм потребления технической воды для рудообогатительной фабрики металлургического предприятия на реальных помесечных данных потребления технической воды и производства продукции. На графиках представлены примеры построения норм удельного (рис. 2, а) и абсолютного (рис. 2, б) потребления технической воды для одного вида произведенной продукции в условиях нормального режима функционирования оборудования.



**Рис. 2. Пример построения норм потребления технической воды**

Штрихпунктирной линией обозначена усредненная характеристика потребления технической воды. Сплошной линией обозначена эффективная характеристика (норма) потребления технической воды. Штриховой и пунктирной линиями обозначены соответственно верхние и нижние пределы нормативного диапазона потребления технической воды. Фактические значения потребления классифицированы и обозначены следующим образом:

- квадрат – режим простоя оборудования;
- треугольник – аварийный режим работы;
- ромб – значение выше усредненной характеристики потребления технической воды (значительный перерасход);
- крест – значения потребления находятся выше нормативного диапазона потребления воды (перерасход);
- круг – значения потребления находятся в нормативном диапазоне потребления воды.

### **Заключение**

Для расчета норм потребления технической воды на производственных подразделениях металлургического предприятия при наличии статистических данных различной степени достоверности и при отсутствии четких регламентированных процедур нормирования рекомендуется использовать представленный метод.

В описанном методе для выявления эффективных режимов работы оборудования при расчете норм потребления технической воды целесообразно использовать метод взвешенных наименьших квадратов, согласно которому вес данных экспоненциально зависит от отклонения фактического значения от нормативного с учетом знака, что позволяет задать меньшим удельным значениям потребления больший вес. При этом для оценки методической погрешности расчета следует использовать метод кросс-валидации при определении нормативного диапазона потребления технической воды.

Для повышения точности определения нормы потребления технической воды предлагается выполнять классификацию данных по сортаменту произведенной продукции, позволяющую учитывать в качестве фактора различные параметры производственного процесса, свойственные определенному сортаменту продукции. При этом для исключения данных, полученных в крайне неэффективных режимах работы, которые превышают норму потребления технической воды, сле-

дует выполнять классификацию данных по режимам работы оборудования. Также для уменьшения влияния неэффективных режимов работы на расчетную норму рекомендуется фильтровать данные по усредненному удельному значению потребления воды.

Рассмотренный методический пример подтверждает возможность применения предложенного метода для расчета норм потребления технической воды на производственных подразделениях металлургического предприятия. Для применения метода в рамках АСУ ТП предлагается использовать представленную в работе функциональную структуру процесса автоматизации расчетов.

### Литература

1. Рыбалов, А.А. Сравнительный анализ методов расчета конвективного теплообмена при охлаждении арматурного проката / А.А. Рыбалов, В.И. Губинский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск: НИИ Укрметаллургинформ. – 2003. – № 1. – С. 117–119.
2. *The study of structure optimization of blast furnace cast steel cooling stave based on heat transfer analysis* / W. Lijun, Z. Weiguo, C. Huier. et al. // *Applied Mathematical Modelling*. – 2007. – Vol. 31, no. 7. – P. 1249–1262.
3. *Водное хозяйство промышленных предприятий: справ. изд.* / В.И. Аксенов, М.Г. Ладыгичев, И.И. Ничкова и др.; под ред. В.И. Аксенова. – М.: Теплотехник, 2005. – Кн. 1. – 640 с.
4. РД 34.02.401-98. Методика разработки норм и нормативов водопотребления и водоотведения на предприятиях теплоэнергетики. – <http://csp.e-apbe.ru/uploads/files/rd34.02.401.pdf>.
5. Ратникова, А.М. Особенности нормирования водопотребления на предприятиях машиностроительной отрасли / А.М. Ратникова // *Вест. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. «Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология»*. – 2012. – № 2. – С. 58–61.
6. Копцев, Л.А. Нормирование и прогнозирование электропотребления предприятий на основе статистических моделей / Л.А. Копцев // *Проблемы электроснабжения на горнорудных и металлургических предприятиях Кузбасса: материалы Всерос. науч.-практ. конф.* – Новокузнецк, 2000. – С. 133–137.
7. Анчарова, Т.В. Анализ и нормирование электропотребления промышленных предприятий с многономенклатурным производством (проблемы и пути решения) / Т.В. Анчарова, А.П. Пищур // *Электро*. – 2003. – № 6. – С. 22–26.
8. Копцев, Л.А. Нормирование и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от объемов производства / Л.А. Копцев // *Промышленная энергетика*. – 1996. – № 3. – С. 5–7.
9. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // *Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 5–13.
10. Казаринов, Л.С. Метод идентификации эффективных рабочих характеристик производственных систем по данным эксплуатации / Л.С. Казаринов, Д.А. Безруков, О.В. Попова // *Теория и практика совершенствования административно-организационного управления с использованием современных информационных технологий и систем: сб. науч. тр.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005 – С. 186–193.
11. Воронцов, К.В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов / К.В. Воронцов // *Математические вопросы кибернетики*. – М.: Физматлит. – 2004. – Т. 13. – С. 5–36.

**Басалаев Александр Анатольевич**, инженер Управления научной и инновационной деятельностью, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); basalaev@ait.susu.ac.ru.

**Казаринов Лев Сергеевич, Казаринов Лев Сергеевич**, д-р техн. наук, профессор, декан Приборостроительного факультета, зав. кафедрой автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); kazarinov@ait.susu.ac.ru.

**Шнайдер Дмитрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); shnyder@ait.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 20 августа 2014 г.

## A METHOD OF CALCULATION OF PROCESS WATER CONSUMPTION RATION FOR IRON AND STEEL PLANTS

**A.A. Basalaeв**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*basalaeв@ait.susu.ac.ru*,

**L.S. Kazarinov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*kazarinov@ait.susu.ac.ru*,

**D.A. Shnayder**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*shnayder@ait.susu.ac.ru*

This paper describes a method of process water consumption ration calculation for production departments of iron and steel plants. The method defines parameters of statistical relationship between specific consumption of process water and production volumes taking into account data classification by production assortment and equipment operating modes. Cross-validation is used to determine a method error of water consumption ration calculation. A case study of ration calculation for ore-dressing unit of iron and steel plant is presented.

*Keywords: energy efficiency, rationing, water consumption, process water, iron and steel industry.*

### References

1. Gubinskiy V.I., Rybalov A.A. [Comparative Analysis of Methods for the Calculation of Convective Heat Transfer During Cooling of Rebars]. *Metallurgical and Mining Industry*, 2003, no. 1, pp. 117–119. (in Russ.)
2. Lijun W., Weiguo Z., Huier C., Yunlong S., Xiaojing L. The Study of Structure Optimization of Blast Furnace East Steel Cooling Stave Based on Heat Transfer Analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, vol. 31, no. 7, pp. 1249–1262.
3. Aksenov V.I. *Vodnoe khozyaystvo promyshlennykh predpriyatiy: spravochnoe izdanie. Kniga 1* [Water Management of Industrial Plants: Reference Book. Book 1]. Moscow, Teplotekhnik Publ., 2005. 640 p.
4. RD 34.02.401-98. *Metodika Razrabotki Norm i Normativov Vodopotrebleniya i Vodootvedeniya na Predpriyatiyakh Teploenergetiki* [A Methodology for Development of Water Consumption and Wastewater Disposal Rations and Ratios for Heat Power Plants]. Available at: <http://ccp.e-apbe.ru/uploads/files/rd34.02.401.pdf> (accessed 13 August 2014).
5. Ratnikova A.M. [Water Consumption Rationing Aspects for Engineering Industry Enterprises]. *The Bulletin of the Brest State Technical University. Ser. Water Engineering, Thermal Engineering and Geoecology*, 2012, no. 2, pp. 58–61. (in Russ.)
6. Koptsev L.A. [Rationing and Forecasts of Electricity Consumption Using Statistical Models]. *Problemy elektrosnabzheniya na gornorudnykh i metallurgicheskikh predpriyatiyakh Kuzbassa: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Issues of Power Supply for Mining and Metallurgical Enterprises in Kuzbass: Proceedings of All-Russian Theoretical and Practical Conference]. Novokuznetsk, 2000, pp. 133–137. (in Russ.)
7. Ancharova T.V., Pishchur A.P. [Analysis and Rationing of Electricity Consumption for Multi-product Industrial Plants (Problems and Solutions)]. *Electro*, 2003, no. 6, pp. 22–26. (in Russ.)
8. Koptsev L.A. [Rationing and Electricity Consumption Forecasting Depending on Outputs]. *Industrial energy*, 1996, no. 3, pp. 5–7. (in Russ.)

9. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Zakharova A.A. [Method of the Power Consumption Forecasting of the Industrial Enterprise]. *Bulletin of the South-Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 5–13. (in Russ.)

10. Kazarinov L.S., Popova O.V., Bezrukov D.A. [Method of Identification for Effective Performance Parameters of Industrial Systems Using Operational Data]. *Teoriya i praktika sovershenstvovaniya administrativno-organizatsionnogo upravleniya s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy i sistem: sb. nauchn. tr.* [Theory and Practice of Administrative Management Improvement Using Modern Information Technology and Systems: Collection of Scientific Works]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2005, pp. 186–193. (in Russ.)

11. Vorontsov K.A. [Combinatorial Approach to Assessing the Quality of Training Algorithms]. *Mathematical Problems of Cybernetics*, 2004, no. 13, pp. 5–36. (in Russ.)

*Received 20 August 2014*