

УДК 621.165

А. Л. ШУБЕНКО, чл. – кор. Национальной Академии наук Украины

Н. Ю. БАБАК, канд. техн. наук

А. В. СЕНЕЦКИЙ, ведущий инженер

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

(г. Харьков, E-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua)

В. А. МАЛЯРЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Харьковская национальная академия городского хозяйства

(г. Харьков, E-mail: malyarenko@ksame.kharkov.ua)

## УТИЛИЗАЦИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ЦЕЛЬЮ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Исследуются вопросы утилизации сбрасываемой теплоты технологических процессов промышленных предприятий посредством установки турбин на низкокипящих рабочих телах. Выполнена оценка получаемой электрической мощности при реализации ORC контура на металлургическом предприятии с полным циклом. Для двух источников теплоты малого потенциала этого предприятия рассчитаны основные характеристики турбин с применением рабочих тел R-600 и R-134a для разных частот вращения ротора. Выбран рациональный вариант.*

*Досліджуються питання утилізації скидної теплоти технологічних процесів промислових підприємств за допомогою встановлення турбін на низькокиплячих робочих тілах. Виконана оцінка електричної потужності реалізуемого ORC контура на металургійному підприємстві з повним циклом. Для двох джерел теплоти малого потенціалу цього підприємства розраховані основні характеристики турбін із використанням робочих тіл R-600 та R-134a для різних частот обертання ротора. Вибрано раціональний варіант.*

### Введение

Рост цен на органическое топливо, его транспортировку и, соответственно, объективное увеличение отпускных цен на электрическую и тепловую энергию принципиально изменяют отношение к использованию в Украине вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и сбросной теплоты промышленных предприятий, в частности. С этой целью, традиционно, если температура ВЭР выше 200 – 250 °С применяется контур с включением котла-утилизатора и паровой турбины. В противном случае применение такого контура малоэффективно.

Последнее десятилетие активно развивается направление по утилизации промышленных ВЭР с выработкой электроэнергии на основе применения турбоустановок на низкокипящих рабочих телах (НРТ). В этих установках реализуется, так называемый, органический цикл Ренкина (ORC) и утилизируются ВЭР, имеющие температуру 80–600 °С (охлаждающая вода, горячий воздух технологических процессов и др.) [1–8].

Имеется целый ряд публикаций, в которых анализируются достоинства и недостатки турбин на НРТ, способы их применения [1–7]. Авторами настоящей работы также рассматривались технико-экономические аспекты применения в Украине указанных турбин для утилизации ВЭР с температурой 80–250 °С [8]. Тем не менее, не все вопросы применения турбин ORC цикла освещены в полной мере и следует считать актуальным продолжение исследований в этом направлении.

### Общая характеристика процессов в турбоустановках с низкокипящими рабочими телами

В качестве рабочих тел в турбинах ORC цикла используют фреоны (по терминологии стран СНГ – хладоны), разрешенные к применению [5–7]. Принципиальная тепловая схема

контура турбоустановки на НРГ представлена на рис. 1, процесс в  $t,s$ -диаграмме – на рис. 2.

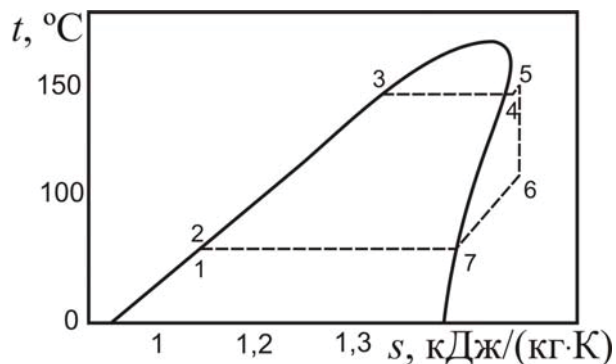
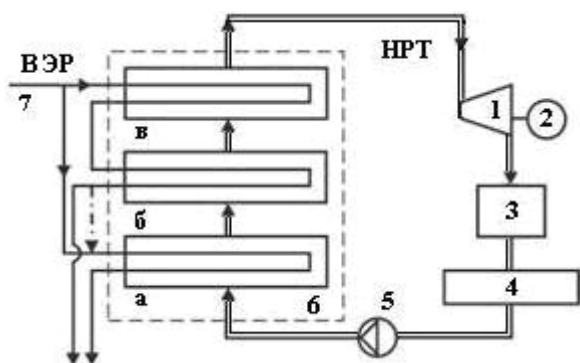


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема когенерационной установки с ORC контуром для утилизации ВЭР [8]

Рис. 2. Идеальный тепловой процесс, протекающий в ORC цикле для пентана, в  $t,s$ -диаграмме

Преобразование тепловой энергии ВЭР (рис. 1) в ORC контуре в механическую и далее в электрическую энергию происходит в замкнутом контуре, который включает: турбину 1 с электрогенератором 2, конденсатор 3, ресивер 4, конденсатный насос 5, парогенератор на НРГ 6 с теплообменными зонами: а – подогрева, б – кипения, в – перегрева.

Если параметры утилизируемых ВЭР низкие (температура 80–200 °С), целесообразно применять НРГ с отрицательным наклоном правой ветви пограничной кривой в  $t,s$ -диаграмме (рис. 2). На этом рисунке ORC цикл включает: 1–2 – сжатие НРГ, 2–3–4–5 – подвод теплоты, 5–6 – процесс расширения НРГ в турбине, 6–7–1 – отвод теплоты с конденсацией. Процесс в турбине заканчивается в области перегретого пара (точка 6 на рис. 2), что исключает эрозию лопаток и не требует перегрева пара перед турбиной. Использование же водяного пара в качестве рабочего тела приводит в этом случае к ухудшению термодинамических показателей и к резкому увеличению габаритов паротурбинных установок, что существенно повышает их стоимость [8].

При выборе рабочих тел для турбин ORC цикла необходимо удовлетворить ряду требований, в частности:

- *экологическим* – озонобезопасность, низкий потенциал глобального потепления, негорючесть и нетоксичность;
- *термодинамическим* – низкая температура кипения при атмосферном давлении; невысокое давление конденсации; высокая теплопроводность; малые плотность и вязкость хладона, обеспечивающие сокращение гидравлических потерь на трение и местные сопротивления при его движении в системе;
- *эксплуатационным* – термохимическая стабильность, химическая совместимость с материалами, негорючесть, невзрывоопасность и т. д.;
- *экономическим* – наличие товарного производства, доступные (низкие) цены.

Фреоны, в полной мере отвечающие перечисленным требованиям, найти затруднительно. Поэтому в каждом отдельном случае выбирают фреон с учетом условий работы машины. Предпочтение отдается НРГ, удовлетворяющему большинству перечисленных требований [6].

#### Получение электроэнергии путем утилизации сбросной теплоты технологических процессов

В металлургической, химической, цементной, строительных материалов и других отраслях промышленности Украины имеются источники сбросной тепловой энергии, утилизация которой позволит снизить энергозатраты, себестоимость основной продукции предприятия. В качестве примера рассмотрим возможности утилизации сбросной теплоты на

металлургическом предприятии посредством преобразования в электрическую энергию с использованием ORC цикла.

В монографии [9] приведена структура выработки и возможного использования ВЭР на металлургическом предприятии с полным циклом. Анализ этой структуры показывает, что на таком предприятии имеется ряд технологических процессов со сбросной теплотой, которую можно использовать для выработки электрической энергии, реализуя ORC цикл (табл. 1) [10, 11].

Таблица 1  
 Параметры источников сбросной теплоты на металлургическом предприятии

| Наименование параметра                               | Доменные печи | Мартеновские печи и кислородные конвертеры | Нагревательные печи | Коксовые батареи | Обжиговые печи |
|--|---------------|--|---------------------|------------------|----------------|
| Температура, °С                                      | 150 – 300     | ≈ 250                                      | 110 – 200           | 300 – 400        | 120 – 200      |
| Средний объем уходящих газов, тыс. м <sup>3</sup> /ч | 80            | 37   | 3                   | 1000             | 35             |

В табл. 2 представлена единичная электрическая мощность выпускаемых турбин ORC цикла для ряда НРТ при утилизации ВЭР различного потенциала и объема.

Таблица 2  
 Возможная получаемая электрическая мощность турбин на НРТ

| Низкокипящие рабочие тела | Формула       | Объем уходящих газов, м <sup>3</sup> /с | Температура, °С              |                                  | Расход рабочего тела, кг/с | Электрическая мощность выпущенных турбин, кВт |
|---------------------------|---------------|---|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---|
|                           |               |   | утилизируемых уходящих газов | рабочего тела на входе в турбину |                            |   |
| R-134a                    | $CH_2F CF_3$  | 8,8 – 25                                | 100 – 140                    | 65 – 100                         | 10,5 – 21,5                | 200 – 800                                     |
| Водоаммиачная смесь       | $NH_3 + H_2O$ | 6,8 – 120                               | 130 – 260                    | 90 – 220                         | 7,3 – 62,7                 | 200 – 7000                                    |
| R-114                     | $C_2F_4Cl_2$  | 5,5 – 22                                | 160 – 200                    | 120 – 160                        | 9,3 – 43,8                 | 200 – 1000                                    |
| R-600                     | $C_4H_{10}$   | 5,5 – 100                               | 160 – 220                    | 120 – 160                        | 6,5 – 52,9                 | 200 – 5000                                    |
| Пентан                    | $C_5H_{12}$   | 4,9 – 100                               | 180 – 220                    | 140 – 180                        | 5,2 – 64,3                 | 200 – 6000                                    |
| Термическое масло         | –             | 15 – 61                                 | 290 – 360                    | 250 – 315                        | 6,5 – 58,3                 | 1000 – 5000                                   |
| Бензол                    | $C_6H_6$      | 85 – 120                                | 340 – 370                    | 300 – 325                        | 65 – 96                    | 6600 – 10000                                  |

Электрический КПД турбины ORC контура в зависимости от параметров ВЭР, соответственно, выбранного рабочего тела и мощности установки лежит в пределах 11 – 21 %. Выбранными НРТ (табл. 2) перечень не ограничивается.

При решении задач энергосбережения на каждом конкретном предприятии источник сбросной теплоты требует индивидуального подхода.

#### Пример расчета турбин ORC цикла

В качестве примера были рассчитаны тепловые схемы утилизационных ORC контуров для двух источников теплоты малого потенциала с целью исследования влияния вида рабочего тела на рациональные значения характеристик турбин. Первый источник – доменная печь (температура уходящих газов 170 °С, в качестве рабочего тела ORC цикла выбран R-600), а

второй – нагревательная печь металлургического комбината (110 °С, R-134a). Выбор рабочего тела осуществлялся, исходя из параметров сбросной теплоты технологического процесса (табл. 2). Расход НРТ на входе в каждую из турбин принимался равным 20 т/ч.

Представлен пример реализации турбин в трехступенчатом исполнении, что позволяет получить компактную турбину достаточно простого конструктивного исполнения.

Основные характеристики осевых турбин на НРТ, полученные с использованием одномерного расчета, представлены в табл. 3. Расчеты выполнялись для частот вращения ротора: 3000, 6000 и 9000 об/мин. Увеличение частоты вращения ротора  $n$  с 3000 до 9000 об/мин приводит к различному приросту мощности турбины: на  $\approx 500$  кВт ( $\approx 25\%$ ) рис. 3, а; на  $\approx 13$  кВт ( $\approx 4\%$ ) рис. 3, б.

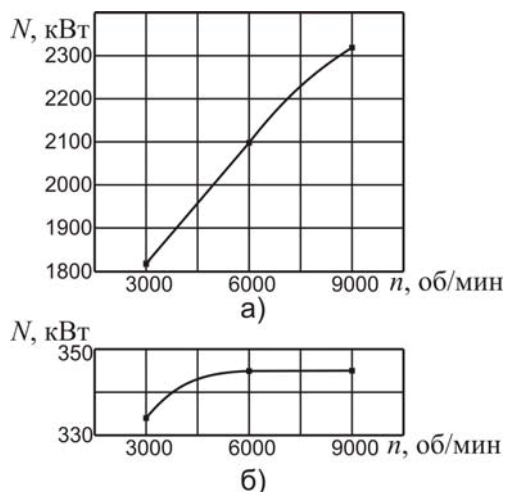


Рис. 3. Изменение мощности турбины в зависимости от частоты вращения: а) рабочее тело R-600; б) рабочее тело R-134a

Таким образом, расчетные исследования подтвердили, что рабочее тело выбирается в зависимости от объема утилизируемой теплоты и температурного потенциала источника. Соответственно, рациональная конфигурация осевой турбины будет иметь различные геометрические и режимные характеристики. Продольные разрезы проточных частей исследуемых осевых турбин с НРТ R-134a и R-600 представлены на рис. 4. Особенностью реализации турбин на НРТ является возможность создания компактной малогабаритной турбины из обычных материалов (низкий уровень температур, минимальные окружные скорости и напряжения). Организация производства турбин данного типа на базе существующих

турбостроительных фирм Украины позволит увеличить экономическую целесообразность их реализации для отечественных промышленных предприятий.

Таблица 3  
Характеристики спроектированных осевых турбин на НРТ

| Характеристики   | R-134a      |           |           | R-600       |           |           |
|--|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
|  | 3000 об/мин |           |           | 9000 об/мин |           |           |
|  | 1 ступень   | 2 ступень | 3 ступень | 1 ступень   | 2 ступень | 3 ступень |
| 1  | 2           | 3         | 4         | 5           | 6         | 7         |
| Расход органического пара на турбину, кг/с               | 20          |           |           | 20          |           |           |
| Параметры НРТ на входе в турбину:                        |             |           |           |             |           |           |
| – давление, МПа  | 1,7         |           |           | 2,65        |           |           |
| – температура, °С  | 70          |           |           | 130         |           |           |
| – плотность, кг/м <sup>3</sup>                           | 61,7        |           |           | 43,5        |           |           |
| Параметры НРТ на выходе из турбины:                      |             |           |           |             |           |           |
| – давление, МПа  | 0,4         |           |           | 0,2         |           |           |
| – температура, °С  | 25          |           |           | 25          |           |           |
| – плотность, кг/м <sup>3</sup>                           | 18,0        |           |           | 5,0         |           |           |
| Скорость выхода потока из сопловой решетки, м/с          | 78,8        | 81,9      | 83,2      | 204,1       | 209,1     | 211       |
| Эффективный угол выхода потока из сопловой решетки, град | 13          | 11        |           | 11          |           |           |
| Средний диаметр ступени, м                               | 0,524       |           |           | 0,425       |           |           |

| Продолжение таблицы 3                                   |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Окружная скорость на среднем диаметре, м/с              | 82,2   | 82,2   | 82,2   | 200    | 200    | 200    |
| Скорость звука на выходе из сопловой решетки, м/с       | 332,4  | 347,5  | 347,0  | 359,9  | 366,6  | 359,5  |
| Степень реактивности                                    | 0,5    | 0,5    | 0,5    | 0,5    | 0,5    | 0,5    |
| 1   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
| Число Маха для сопловой решетки                         | 0,25   | 0,25   | 0,25   | 0,58   | 0,58   | 0,60   |
| Относительная скорость                                  | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,7    |
| Скорость входа потока в рабочую решетку, м/с            | 18,5   | 15,7   | 15,9   | 39,0   | 40,2   | 40,9   |
| Эффективный угол входа потока в рабочую решетку, град   | 73,3   | 83,4   | 88,0   | 89,4   | 82,5   | 80,0   |
| Высота сопловой решетки, мм                             | 15,4   | 19,0   | 32,0   | 13,4   | 23,9   | 53,8   |
| Эффективный угол выхода потока из рабочей решетки, град | 8,9    | 11,3   | 13,3   | 12,5   | 14,8   | 15,6   |
| Высота рабочей решетки, мм                              | 18,9   | 22,5   | 35,5   | 16,4   | 26,9   | 56,8   |
| Скорость потока на выходе из рабочей решетки, м/с       | 12,7   | 16,1   | 18,9   | 43,8   | 51,6   | 56,2   |
| Угол выхода потока, град                                | 100,5  | 100,8  | 100,4  | 94,4   | 96,4   | 88,5   |
| Удельные потери энергии:                                |        |        |        |        |        |        |
| – в сопловой решетке                                    | 0,0488 | 0,0467 | 0,0372 | 0,0191 | 0,0179 | 0,0166 |
| – в рабочей решетке                                     | 0,0949 | 0,0843 | 0,0789 | 0,0924 | 0,0992 | 0,0983 |
| – с выходной скоростью                                  |        |        | 0,0248 |        |        | 0,0354 |
| КПД ступени, %  | 73,52  | 83,58  | 83,26  | 79,33  | 85,51  | 89,79  |
| Относительный внутренний КПД турбины, %                 | 80,1   |        |        | 84,9   |        |        |
| Суммарная внутренняя мощность установки, кВт            | 331,7  |        |        | 2332,8 |        |        |

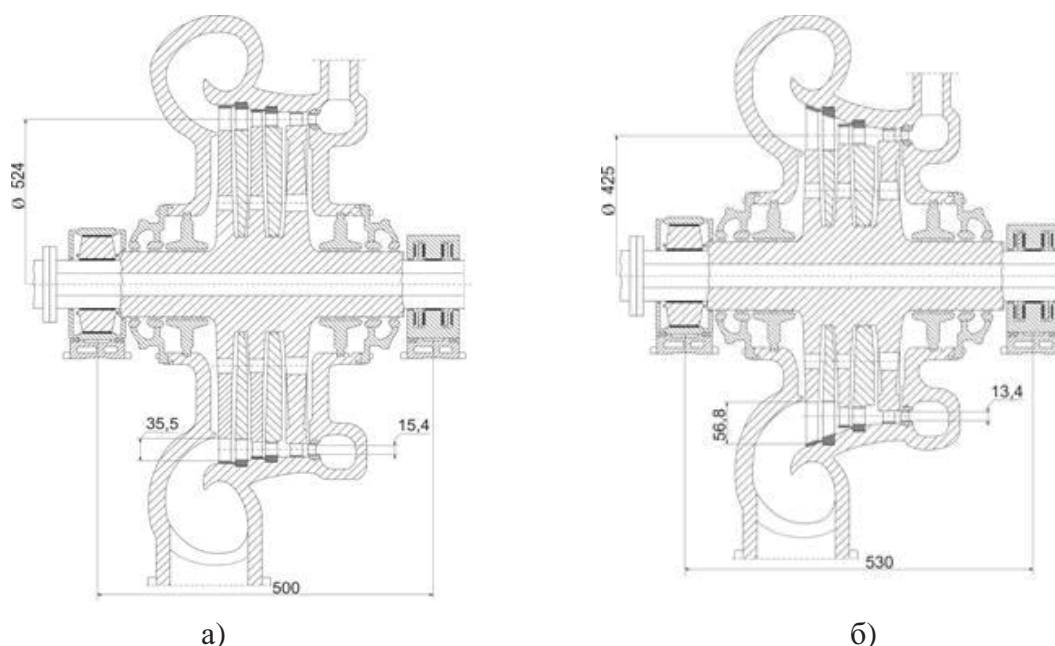


Рис. 4. Продольный разрез осевой турбины на НРТ:  
 а) рабочее тело R-134а, частота вращения ротора 3000 об/мин;  
 б) рабочее тело R-600, частота вращения ротора 9000 об/мин



### Выводы

Выполненные оценки позволили установить, что утилизация ВЭР в промышленности Украины при применении турбин на НРТ позволит получить дополнительно  $\approx 200$  МВт электрической мощности.

Расчеты показали, что для рассматриваемого варианта конструктивного исполнения турбин при применении различных теплоносителей (их выбор зависит от потенциала ВЭР), экономически целесообразное число оборотов ротора турбины будет различное: например, для турбины на бутане (R-600) – 9000 об/мин, а на фреоне (R-134a) – 3000 об/мин.

Вопросам разработки, производства и внедрения турбин на НРТ в Украине, по нашему мнению, уделяется недостаточно внимания. Выпуск в стране турбин на фреонах для утилизации ВЭР, вероятно, позволит уменьшить их стоимость, тем самым повысить экономическую привлекательность соответствующих энергосберегающих проектов.

### Список литературы

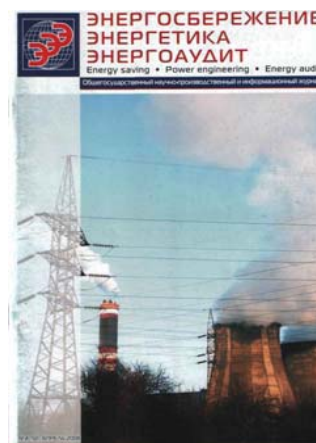
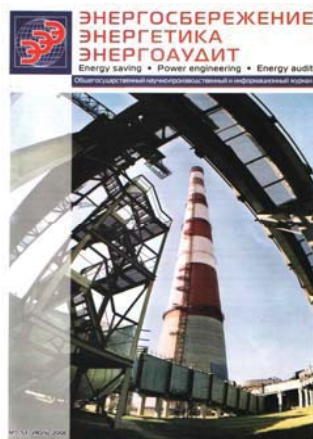
1. Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкокипящими рабочими телами / Б. Билека, Е. Васильев, В. Избаш и др. // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 5. – С. 6–10.
2. Редько А. А. Термодинамические параметры геотермальной электрической станции с бинарным сверхкритическим циклом / А. А. Редько // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2009. – № 4. – С. 81–85.
3. Пятничко В. А. Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии с использованием пентана в качестве рабочего тела / В. А. Пятничко, Т. К. Крушневич, А. И. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 3–6.
4. Утилизационные энергетические установки с органическими теплоносителями / Г. Р. Шварц, С. В. Голубев, Б. П. Левыкин и др. // Газов. пром. – 2000. – № 6. – С. 14.
5. Legmann H. Recovery of low grade heat by means of the ORC process in the cement industry / Hilel Legmann, David Citrin [Электронный ресурс]: официальный сайт производителя – ORMAT International, Inc. [2010]: Режим доступа : [http://www.ormat.com/media\\_center.php?id=147&aid=818df6349556350f09466946eb1c7b9b](http://www.ormat.com/media_center.php?id=147&aid=818df6349556350f09466946eb1c7b9b) – Последнее обращение: 02.02.2012. – Загл. с экрана.
6. Базаев А. Р. Исследование термодинамических свойств смесей технически важных веществ как эффективных теплоносителей в энергетических установках / А. Р. Базаев // ФИЗИКА. – 2007. – СИЛД XIII, № 1–2. – С. 57–60.
7. Гринман М. И. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами / М. И. Гринман, В. А. Фомин // Энергомашиностроение. – 2006. – № 1. – С. 63–69.
8. Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов посредством установки турбины на низкокипящем рабочем теле / А. Л. Шубенко, Н. Ю. Бабак, М. И. Роговой и др. // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. – 2010. – № 6. – С. 18–26.
9. Никифоров Б. И. Энергосбережение на металлургических предприятиях: Монография / Б. И. Никифоров, Г. В. Заславец. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 280 с.
10. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р. Наказ Міністра промислової політики України № 152 від 25.02.2009 року. – 123 с. Режим доступа : <http://195.78.68.71/industry/control/uk/archive/docview?typeId=73191> – Последнее обращение: 02.02.2012. – Загл. с экрана.

## UTILIZATION OF WASTE WARMTH OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE FOR THE PURPOSE OF ELECTRIC POWER DEVELOPMENT

A. L. SHUBENKO, Cor.Memb. NAS of Ukraine  
V. A. MALYARENKO, Dr. Tech. Sciens, Prof.  
N. U. BABAK, Cand. Tech. Sciens  
A. V. SENECKIY, leading engineer

*Questions of utilization of dumped warmth of technological processes of the industrial enterprises by means of installation of turbines on low-boiling working bodies are investigated. The assessment of the received electric capacity is executed at realization of ORC of a contour at the metallurgical enterprise with a full cycle. For two sources of warmth of small capacity of this enterprise the main characteristics of turbines with application of working bodies R-600 and R-134a for different frequencies of rotation of a rotor are calculated. The rational option is chosen.*

Поступила в редакцию 06.04 2012 г.



### ***Уважаемые читатели!***

На страницах журнала  
«ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ · ЭНЕРГЕТИКА · ЭНЕРГОАУДИТ»  
продолжается заочное заседание

«круглого стола» на тему:

***«Государственная политика энергосбережения в Украине:  
организация, управление, стимулирование».***

К обсуждению данной темы приглашаем  
руководителей государственных администраций  
и энергопередающих компаний, промышленных предприятий,  
ученых и всех заинтересованных.

Вашу позицию по указанной проблеме  
предлагаем изложить письменно и направить в наш адрес:

61002, г. Харьков, ул. Мироносицкая, 60,  
Тел./факс (057) 7-149-451,

E-mail: [sveco\\_ltd@rambler.ru](mailto:sveco_ltd@rambler.ru), [sveco\\_zhurn@bigmir.net](mailto:sveco_zhurn@bigmir.net)