

## ТЕНДЕНЦИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ КОГЕНЕРАЦИИ

В. А. Маляренко, А. Л. Шубенко, А. В. Сенецкий, И. А. Темнохунд

*Исследуются вопросы целесообразности реализации комбинированного производства тепловой и электрической энергии - когенерации. Показано, что применение когенерации позволяет более эффективно использовать топливозаэнергетические ресурсы. Так, удельный расход топлива на производство электроэнергии при реализации мини-ТЭЦ на паровых котельных в среднем составляет 180 г.у.т. / (кВт • ч).*

*Ключевые слова: малая энергетика, когенерация, турбина, схема энергетических потоков.*

### **Введение.**

В настоящее время перед большинством стран, в частности, и перед Украиной, особенно остро стоит задача экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Это, прежде всего, связано с уменьшением запасов органического топлива и, соответственно, резким увеличением его стоимости, что приводит к нарушению и перебоям снабжения отдельных регионов и потребителей топливом, тепловой и электрической энергией. Одним из реальных направлений решения сложившейся проблемы является развитие малой энергетики. Большим потенциалом здесь обладает процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии – когенерация, которая, помимо всего прочего, создает возможность для развития всей экономики страны [1].

Реконструкция и перевод действующих котельных в мини-ТЭЦ (электрической мощностью до 50 МВт), расположенных в непосредственной близости от конечного потребителя, дает возможность вырабатывать электрическую и тепловую энергию, как на собственные нужды станции, так и получать дополнительную прибыль от ее реализации в энергосистему.

Тем более, что на современном этапе развития турбиностроения в качестве рабочих тел в замкнутом цикле возможно применение, как водяного пара, так и жидкостей, имеющих низкие температуры кипения, реализуя органический цикл Ренкина (ORC) [2].

### **ПРЕИМУЩЕСТВА КОГЕНЕРАЦИИ.**

Мини-ТЭЦ может использоваться в качестве основного или резервного источника электроэнергии для объектов коммунального хозяйства и очистных сооружений, предприятий промышленности и сельского хозяйства,

административных и медицинских учреждений, жилых комплексов как в автономном режиме, так и совместно с централизованными системами тепло- и электроснабжения.

Преимущества от использования систем когенерации распределяются на четыре группы, тесно связанные друг с другом: экономику, надежность, утилизацию тепла, экологию [3].

При эксплуатации традиционных (турбинных) электростанций в связи с технологическими особенностями процесса генерации энергии большое количество выработанного тепла сбрасывается в атмосферу через конденсаторы пара, градирни и т. п. Большая часть этого тепла может быть утилизирована и использована для удовлетворения тепловых потребностей, что повышает эффективность обычных электростанций с 30–50 % до 80–90 % в системах когенерации. Сравнение когенерации и отдельного производства электричества и тепла представлено в таблице 1.

На рисунке 1 приведена тепловая схема миниэлектростанции, где параллельно РОУ установлена паровая противодавленческая турбина, обеспечивающая выработку электрической мощности, что уменьшает расходы промышленного предприятия на приобретение электроэнергии от сети. Тепловая мощность мини-ТЭЦ резервируется отпуском пара от РОУ паровых котлов, работающих на общую магистраль.

Появление на отечественном рынке энергетических установок малой мощности с неплохими экономическими показателями (КПД, габаритные размеры, стоимость) дает возможность реализовать комбинированную выработку тепла и электроэнергии.

МАЛЯРЕНКО В. А., ШУБЕНКО А. Л., СЕНЕЦКИЙ А. В., ТЕМНОХУД И. А.

Схема потока тепловой и электрической энергии на паровых промышленных и промышленно-отопительных котельных, переве-

денных в разряд мини-ТЭЦ, приведена на рисунке 2.

Таблица 1 – Сравнение раздельного производства электроэнергии и тепла с когенерацией

Раздельное производство электроэнергии и тепла:		
Топливо 100%	Электростанция	Электроэнергия 36%
Топливо 100%	Котельная	Тепло 80%
		<b>Общая эффективность:</b> $\text{КПД} = \frac{36+80}{200} = 58\%$ Минус потери при транспортировке тепла и электроэнергии к потребителю.
Когенерация:		
Топливо 100%	Когенерационная установка	Электроэнергия 42% Тепло 45%
		<b>Общая эффективность:</b> $\text{КПД} = \frac{42+45}{100} = 87\%$ Потери транспортировки энергий к потребителю практически отсутствуют!

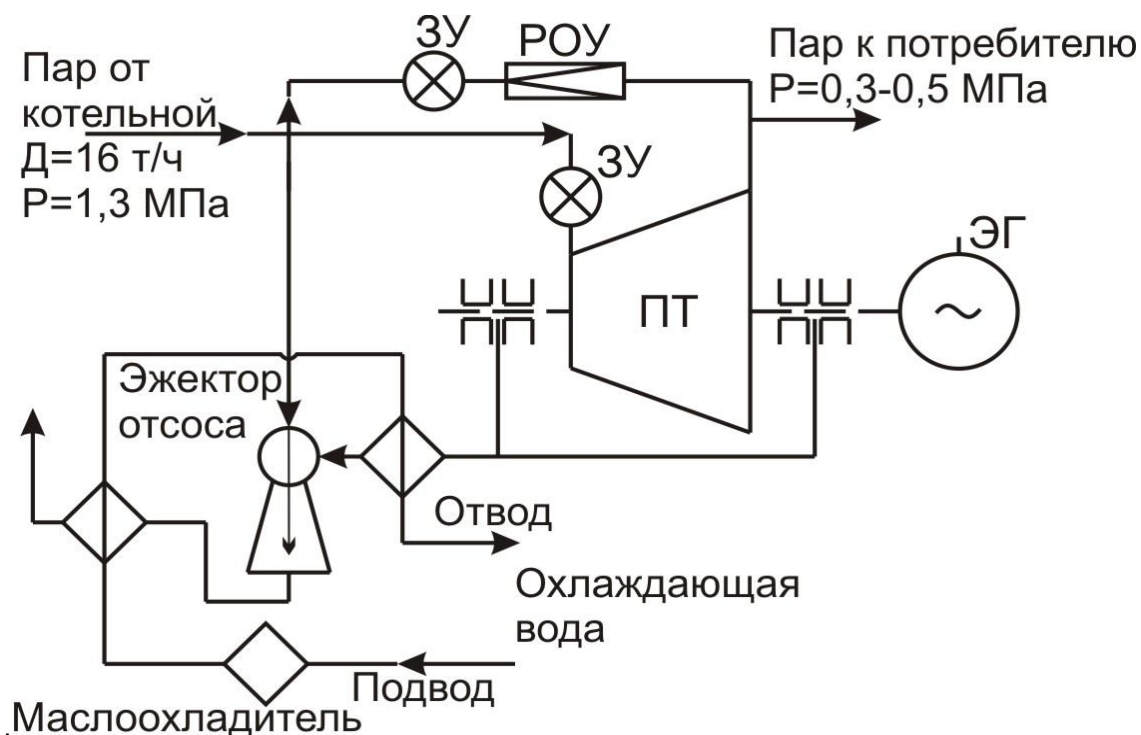


Рисунок 1 – Схема подключения противоаварийной турбины на промышленно-отопительной котельной

Для повышения экономичности таких энергоустановок предусматривается охлаждение маслоохладителя (МО), охладителя генератора (ОГ) и эжектора отсоса пара из

уплотнений (ЭО) химочищенной воды, подаваемой в деаэрактор котельной.

Эта часть тепла показана в виде контура «регенерация тепла» на рисунке 2.

## ТЕНДЕНЦИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ КОГЕНЕРАЦИИ

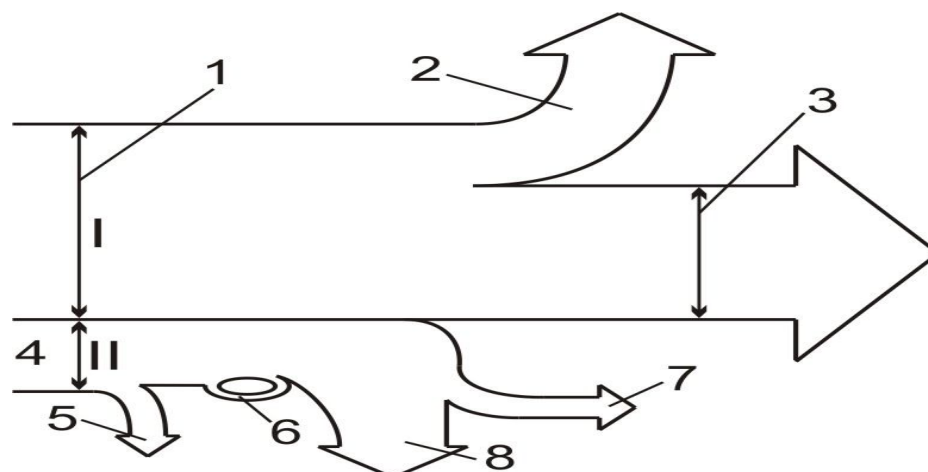


Рисунок 2 – Схема энергетических потоков при комбинированной выработке тепла и электроэнергии: I – основной цикл без электроэнергетической нагрузки; II – дополнительный цикл надстройки; 1 – тепло основного топлива; 2 – потери тепла при сжигании основного топлива (с уходящим газом, продувкой); 3 – пар к потребителю; 4 – тепло дополнительного топлива,  $\Delta Q$ ; 5 – потери тепла при сжигании дополнительного топлива; 6 – регенерация тела; 7 – потери с воздушным охлаждением генератора  $\Delta N$  и другие потери; 8 – электроэнергия,  $N$

При отсутствии электроэнергетической надстройки котельная вырабатывает в основном цикле тепловую энергию  $Q$  с расходом топлива  $B$ . Потери определяются по значению КПД котла  $\eta_k$  (потери в трубопроводах и у потребителя в основном цикле отнесены к теплопотреблению).

Определение эффективности электроэнергетической надстройки осуществляется при условии, что потребитель получает такое же количество тепла, как и при отсутствии надстройки.

При выработке электрической мощности  $N$  требуется дополнительное топливо  $\Delta B$ , которое также сжигается с КПД котла  $\eta_k$ . В этом случае могут наблюдаться небольшие дополнительные потери энергии  $\Delta N$  в виде утечек тепла в трубопроводах подвода пара к турбогенератору и отвода его от последнего при воздушном охлаждении генератора (это тепло невозможно утилизировать в системе регенерации), а также при невозможности реализовать регенерацию тепла от маслоохладителей и эжекторов с использованием химочищенной воды. Эти потери должны быть покрыты дополнительным расходом топлива.

Удельный расход топлива на 1 кВт·ч при полезной электрической мощности  $N$  равен  $b = \Delta B / N$ .

Коэффициент полезного действия котла не зависит (или очень слабо зависит) от его теплопроизводительности при небольшом ее изменении. Тогда из диаграммы (рисунок 1) следует, что дополнительное тепло топлива,

необходимое для выработки электроэнергии мощностью  $N$  и КПД котла  $\eta_k$ , составляет

$$\Delta Q = \frac{N + \Delta N}{\eta_k}. \quad (1)$$

Исходя из этого, расход дополнительного топлива с теплотой сгорания  $Q_n^p$ , которое идет на выработку электроэнергии, можно записать в виде

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_n^p}. \quad (2)$$

В случае полной регенерации тепла охладителей (МО, ОГ, ЭО),  $\Delta N$  определяется только теплопотерями от труб подвода и отвода пара к турбогенератору, т. е. потерями от дополнительных трубопроводов. Если их протяженность невелика, то этими потерями можно пренебречь.

Тогда удельный расход условного топлива  $b$  кг/т/(кВт·ч) составит

$$b = \frac{\Delta B}{N} = \frac{0,123}{\eta_k}. \quad (3)$$

При наличии протяженных дополнительных трубопроводов, а также при охлаждении эжектора, генератора и маслоохладителя водой системы технического водоснабжения (не химочищенной водой, т. е. без регенерации тепла) потери мощности  $\Delta N$  возрастут на значение тепловой мощности маслоохладителя, охладителей генератора, эжектора и потерь в трубопроводах  $\Delta Q_{mp}$ :

$$\Delta N = N(1 - \eta_m) + N(1 - \eta_z) + \Delta Q_z + \Delta Q_{mp}, \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta Q_z = (G_p + G_{ynl})(h_p - h_6),$$

где  $G_p$  – расход рабочего пара на эжектор;  
 $G_{упл}$  – расход пара через концевые уплотнения;

$h_p$  – энтальпия рабочего пара;

$h_e$  – среднemasсовая энтальпия питательной воды перед деаэратором.

В общем случае при расчете удельного расхода топлива с учетом потерь по (4) имеем

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q &= \frac{N + \Delta N}{\eta_k} = \frac{N}{\eta_k} \left( 1 + \frac{\Delta N}{N} \right); \\ b &= \frac{0,123}{\eta_k} \left( 1 + \frac{\Delta N}{N} \right). \end{aligned} \right\} (5)$$

При полном использовании тепла охладителей для подогрева химочищенной воды при  $\eta_k=0,9$  получаем

$$b = \frac{0,123}{0,9} = 0,141.$$

Расход удельного топлива на выработку электроэнергии при установке противоаварийной турбины, можно оценить по формулам (3)–(5).

При охлаждении МО, ОГ и ЭО водой системы технического водоснабжения для установок типа Р-6-35/5-1:  $G_p=432$  кг/ч (0,12 кг/с),  $t_{пв}=50$  °С,  $G_{упл}=1320$  кг/ч (0,36 кг/с),  $\eta_e=0,95$ ,  $\eta_m=0,98$ ,  $N=6000$  кВт. Тогда получим  $b = 0,180$  кг/т/(кВт·ч).

Из приведенных примеров видно, что удельный расход топлива на выработку электроэнергии при реализации мини-ТЭЦ с применением паровых противоаварийных турбин малой мощности, на базе паровых промышленных и промышленно-отопительных котельных, в среднем, составляет  $180$  г/т/(кВт·ч). Данные показатели значительно лучше, чем для мощных энергетических установок (по Украине  $360$ – $380$  г/т/(кВт·ч)), что свидетельствует о конкурентоспособности малой энергетики и необходимости внедрения турбин малой мощности [4, 5].

#### **Реализация турбин на низкокипящих рабочих телах**

Применяя традиционные рабочие тела, необходимо не забывать о нетрадиционных установках, которые дополняют существующие и позволяют генерировать дополнительную энергию с минимальными конструктивными изменениями и капитальными затратами. К ним относятся энергоутилизационные установки с замкнутым рабочим циклом на низкокипящих рабочих телах (НРТ), позволяющие эффективно утилизировать средние и низкопотенциальные потоки теплоты. Реализовать такую схему возможно, используя

сбросную теплоту технологических процессов предприятий, выхлопного пара паротурбинных установок и т. д. [6]. При этом главной особенностью является работа турбины на низкокипящем рабочем теле, что позволяет максимально эффективно использовать получаемую, казалось бы, малоэффективную теплоту.

Схема с замкнутым рабочим циклом на низкокипящем рабочем теле реализована на ОАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» (СНПО). Установка выполнена на основе пентановой турбины ТПР-4/6-1,45/0,1, обеспечивающей электрическую мощность 4 МВт. Рабочим телом для нее служит n-пентан. Проект установки разработан ОАО «Укрхимпроект» (г. Сумы, Украина). Данная энергоутилизационная установка является экспериментальной, суммарная наработка установки во время испытаний составила более 300 часов [2].

#### **Когенерация в промышленности с применением турбин на НРТ**

На территории Украины имеются металлургическая, химическая, цементная, строительных материалов и другие отрасли промышленности. Большинство из них включают в себя низко-, средне- и высокотемпературные технологические процессы, тепловая энергия после которых сбрасывается в атмосферу и безвозвратно теряется. Утилизация сбросной теплоты с целью выработки электроэнергии на основе установки турбин малой мощности (как водяном паре, так и на НРТ) позволит вырабатывать электроэнергию на собственные нужды предприятия и тем самым снизить энергозатраты и себестоимость основной продукции предприятия.

В качестве примера рассмотрим типовое металлургическое предприятие с соответствующими технологическими процессами, сбросную теплоту которых можно использовать посредством преобразования в электроэнергию с применением ОРС цикла.

В монографии [7] приведена структура выработки и возможного использования вторичных энергетических ресурсов (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 ОРС цикл (таблица 2) [8, 9].

В таблице 3 представлена единичная электрическая мощность выпускаемых турбин ОРС цикла для ряда НРТ при утилизации ВЭР различного потенциала и объема.

## ТЕНДЕНЦИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ КОГЕНЕРАЦИИ

Таблица 2 – 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

Таблица 3 – 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– 3,8	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, используемого рабочего тела и мощности установки изменяется в пределах 11–21 %. Выбранными НРТ (таблица 3) перечень не ограничивается.

При решении задач энергосбережения в каждом конкретном случае источник сбросной теплоты требует индивидуального подхода.

Таким образом, как следует из проведенного анализа, одним из основных направлений при решении задач энергосбережения на энергоузлах промышленных предприятий и коммунальных котельных является их перевод в мини-ТЭЦ путем установки малых паровых турбин.

### **Потенциал использования систем когенерации в Украине**

Если рассмотреть энергетическую стратегию Украины и связанную с этим структуру производства тепла до 2030 года, то при использовании 50 % тепловой мощности установленных котлов производительностью 15–20 тонн пара в час только в коммунальных котельных до 2030 года может быть установлено до 1 200 паротурбинных установок с мощностью в одном агрегате 1 МВт.

На территории Украины функционирует множество котельных, на которых применяют процесс дросселирования пара вместо процесса его расширения в энергетической установке для выработки электроэнергии с не-

значительной добавкой топлива. Исследование наличия и состояния паровых котлов в различных отраслях промышленности показало следующее.

В котельных, работающих на шахтах Украины количество котлов типа ДКВР, с которыми могут работать малые турбины, составляет:

- 6,5 т/ч – более 150 ед.;
- 20 т/ч – 30 ед.;
- 10 т/ч – около 300 ед.;
- 25 т/ч – 20 ед.

Если в связи с закрытием шахт останется в рабочем состоянии 25 % этих котлов, то даже в этом случае на шахтных котельных могут быть использованы примерно 70–75 турбоустановок мощностью 0,75–1 МВт, энергия которых будет использована на собственные нужды шахт.

В пищевой промышленности находятся в эксплуатации около 400 котлов паропроизводительностью от 6,5 т/ч до 16 т/ч при начальном давлении 1,4 МПа, что позволяет использовать порядка 200–250 турбоустановок мощностью до 1 МВт.

По имеющимся оценкам в разных отраслях промышленности установлено около 1 500 единиц котлов паропроизводительностью 6,5–25 т/ч, имеющих начальное давление 1,4 МПа. При соответствующей реконструкции энергоузлов на промпредприятиях можно установить до 600–700 турбоустановок.

Таким образом, по прогнозируемой оценке, рынок малых паротурбинных установок мощностью 0,75–1,5 МВт в Украине до 2030 года (при условии возрождения предприятий и развития теплоснабжения городов и поселков) может составить 2 100–2 200 единиц. Стоимость их установки при необходимой реконструкции энергоузлов составит 1,05–1,1 млрд. USD, что существенно ниже стоимости нового оборудования такой же мощности. В отдельных случаях целесообразно устанавливать турбины малой или средней мощности в конденсационном варианте. Примером служит выполненная с участием ИПМаш НАН Украины установка турбины ПТ-12/13-34/1,0-1 мощностью 12 МВт производства Калужского турбинного завода (Россия) на энергоузле Ясиновского коксохимического завода (г. Макеевка). Экономическая целесообразность такого варианта реконструкции энергоузла базируется на возможности использования относительно дешевого коксового газа на существующем парогенерирующем оборудовании завода.

Однако, в большинстве случаев, как уже отмечалось, экономически оправданным является лишь вариант с использованием противодавленческих турбин. Такая турбоустановка позволяет при достаточно высоком КПД получать электроэнергию либо с незначительной добавкой топлива (при необходимости строго выдерживать заданное в технологии количество тепла), либо без дополнительного топлива при работе на теплофикацию и регулирование температуры теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха. По оценкам, представленным выше, дополнительный расход топлива на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии не превышает 180 г.у.т.

В силу объективных причин, при переводе котельной на комбинированную схему производства тепловой и электрической энергии для ведения теплоэнергетических процессов требуются новые критерии оптимизации, отличные от проектных при строительстве котельной. Речь может идти о разработке технологии производства электроэнергии по комбинированной схеме для каждого конкретного заказчика [5]. Так, в ИПМаш НАН Украины выполнена оценка возможности установки малых турбин для утилизации энергии процесса дросселирования пара в теплоэнергетическом центре Роганского промузла (ТЦРП) г. Харькова, на котором установлено три работающих котла ДКВР-20/1,3 производительностью 20 т/час пара каждый и

резервный котел ДВ-24/14ТМ, производительностью 25 т/час, эксплуатируемые с 1971–1974 гг. [10, 11].

Таким образом, внедрение малых турбин как автономного энергосберегающего источника электроэнергии позволит до 2030 года иметь компенсационную установленную мощность на уровне 2 200 МВт, что составит от общей установленной мощности к 2030 году ~ 3 % [12]. Согласно базовому сценарию энергетической стратегии Украины на период до 2030 года при общей потребности производства электроэнергии на уровне 380 млрд. кВт·ч, с учетом сезонного графика выработки тепла, на турбинах малой мощности может быть произведено ~ 13 млрд. кВт·ч электроэнергии в год, что составит 3,5 % от общего производства. Выработка такого количества электроэнергии позволит экономить в год 1,2 млн. т.у.т. [13, 14].

#### **Выводы.**

Реализуя когенерационные системы, необходимо принимать во внимание, что каждый проект требует индивидуального подхода. Это связано с внешними (цены на топливо, надежность снабжения, тарифы сетей) и внутренними (профиль потребления тепла и электроэнергии, пиковые нагрузки, необходимый уровень надежности и качества энергоснабжения) факторами.

Для получения высокой эффективности от внедрения когенерации необходимо, помимо установки современного оборудования, провести анализ, выработать и реализовать мероприятия по повышению энергетической эффективности объекта в целом, с уже существующим оборудованием. Сочетание оценки экономической составляющей проекта и тщательного контроля за исполнением позволит реализовать решение, которое обеспечит конкурентные преимущества на рынке.

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

В то же время, вопросам разработки, производства и внедрения турбин на водяном паре и НРТ в Украине, уделяется пока еще недостаточно внимания. Выпуск турбин малой мощности позволит уменьшить их стоимость и тем самым повысить экономическую привлекательность соответствующих энергосберегающих проектов.

## ТЕНДЕНЦИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ КОГЕНЕРАЦИИ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маляренко, В. А. Потенциал интеграции когенерационных систем в малую энергетику Украины / В. А. Маляренко, А. Л. Шубенко, А. В. Сенецкий, И. А. Темнохуд. // Интегровані технології та енергозбереження. – № 4. – 2012. С.11–17.
2. 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 // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 3–6.
3. Анализ эффективности применения когенерационных установок [Электронный ресурс]: официальный сайт производителя – ЧНПП «Фрезия» [2006]: Режим доступа : <http://www.sinus.org.ua/> – Последнее обращение: 20.06.2012. – Загл. с экрана.
4. Использование паровых турбин малой мощности для энергосбережения на энергоузлах предприятий / А. Л. Шубенко, Н. Ю. Бабак, М. И. Роговой, А. В. Сенецкий // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3. – С. 14–17.
5. Федоров, В. А. Опыт разработки, строительства и ввода в эксплуатацию малых электростанций / В. А. Федоров, В. М. Смирнов // Теплоэнергетика. – 2000. – № 1. – С. 9–13.
6. Сенецкий, А. В. Энергосбережение на основе применения турбин малой мощности на низкотемпературных рабочих телах / А. В. Сенецкий // Современные проблемы машиностроения. Конференция молодых ученых и специалистов 3–6 ноября 2010 г.: тез. докл. – Харьков, 2010. – С. 67.
7. Никифоров, Б. И. Энергосбережение на металлургических предприятиях : монография / Б. И. Никифоров, Г. В. Заславец. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 280 с.
8. Казанцев, Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
9. 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?typeld=73191> – Последнее обращение: 02.02.2012. – Загл. с экрана.
10. Данилов, Н. И. Домашняя энергетика / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков. – М. : Департамент топливно-энергетического хозяйства г. Москвы, 2006. – 118 с.
11. Интенсификация использования топливно-энергетических ресурсов : научное издание / под ред. Т. А. Ашимбаева. – Алма-Ата : Наука, 1989. – 212 с.
12. Повышение эффективности использования энергоресурсов в автономных котельных на основе внедрения на них турбогенераторных установок малой мощности / Л. М. Соболев, А. Л. Шубенко, В. Н. Голощапов и др. // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: сб. тр. междунар. научно-техн. конф. – Харьков, 1997. – С. 57.

*Маляренко В. А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины, E-mail: [malyarenko@ksame.kharkov.ua](mailto:malyarenko@ksame.kharkov.ua); Темнохуд И. А., ассистент, E-mail: [innatemnokhud@mail.ru](mailto:innatemnokhud@mail.ru), Украина, г. Харьков, Харьковский национальный университет городского хозяйства; кафедра «Электроснабжение городов»; Сенецкий А. В., к.т.н., м.н.с., E-mail: [aleksandr-seneckij@ukr.net](mailto:aleksandr-seneckij@ukr.net); Шубенко А. Л., Украина, г. Харьков, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, отдел оптимизации процессов и конструкций турбомашин.*