

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОКУПАЕМОСТИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ В СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ НУЖД ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Розроблено економіко-математичну модель окупності капітальних вкладень у новий спосіб комплексного використання низькопотенційних теплових вторинних енергетичних ресурсів систем водяного охолодження рекуперативних теплообмінників технологічних агрегатів для обґрунтування доцільності проектування і впровадження енергозберігаючих систем теплопостачання при технології підготовки поживної води. Представлено параметри що збурюють, а також вхідні, керуючі, вихідний параметри розробленої ЕММ. Обґрунтовано допущення, граничні умови і обмеження ЕММ. У результаті комп'ютерної реалізації ЕММ при фіксованих вхідних параметрах, фіксованих параметрах що збурюють і змінних керуючих параметрах встановлена нелінійна залежність вихідного параметра моделі від відношення керуючих параметрів. Обґрунтовано доцільність проектування енергозберігаючих СППВ із вищевказаним споживанням вихідної води, зі строком окупності не більш 2-х років, при визначеному відношенні керуючих параметрів ЕММ.

Разработана экономико-математическая модель окупаемости капитальных вложений в новый способ комплексного использования низкопотенциальных тепловых вторичных энергетических ресурсов систем водяного охлаждения рекуперативных теплообменников технологических агрегатов для обоснования целесообразности проектирования и внедрения энергосберегающих систем теплоснабжения при технологии подготовки питательной воды. Представлены входные, управляющие, возмущающие и выходной параметры разработанной ЭММ. Обоснованы допущения, граничные условия и ограничения ЭММ. В результате компьютерной реализации ЭММ при фиксированных входных, возмущающих параметрах и варьируемых управляющих параметрах установлена нелинейная зависимость выходного параметра модели от отношения управляющих параметров. Обоснована целесообразность проектирования энергосберегающих СППВ с вышеуказанным потреблением исходной воды, со сроком окупаемости не более 2-х лет, при определенном отношении управляющих параметров ЭММ.

Economical and mathematical model (EMM) of recoupage of capital investment in a new method of integrated utilization of low-potential waste energy of the systems of water cooling (WCS) of recuperative heat-exchangers (RHE) of manufacturing plants has been developed to justify expediency of design and implementation of energy-saving heat supply systems in feed water treatment technology. The input, control, disturbing and output parameters of the developed EMM are presented. Assumptions, boundary conditions and limitations of EMM are validated. As a result of computer-based implementation of economical and mathematical model at fixed input and disturbing parameters and variable control parameters a non-linear dependence of the input parameter of the model on relation of control parameters has been established. The expediency of design of energy-saving FWTS with the above mentioned consumption of initial water and recoupage term of no more than 2 years at the established relation of the control parameters of the EMM has been justified.

$A$  – удельное сопротивление трубопровода,  $\text{с}^2/\text{м}^2$ ;  
 $a_u, a_n$  – удельные стоимости изоляции ( $\text{грн}/\text{м}^3$ ) и защитного покрытия, ( $\text{грн}/\text{м}^2$ );

$B_{\text{эк}}^m$  – количество сэкономленного топлива за год, тыс.  $\text{м}^3$ ;

$C^m$  – удельная стоимость топлива (газа),  $\text{грн}/\text{тыс. м}^3$ ;

$C_{\text{вер}}$  – себестоимость отпущенной энергии за год, при использовании НТВЭР,  $\text{грн}$ ;

$C_{\text{нвв}}$  – годовая стоимость потерь питательной воды, вследствие увеличения объёма СППВ,  $\text{грн}$ ;

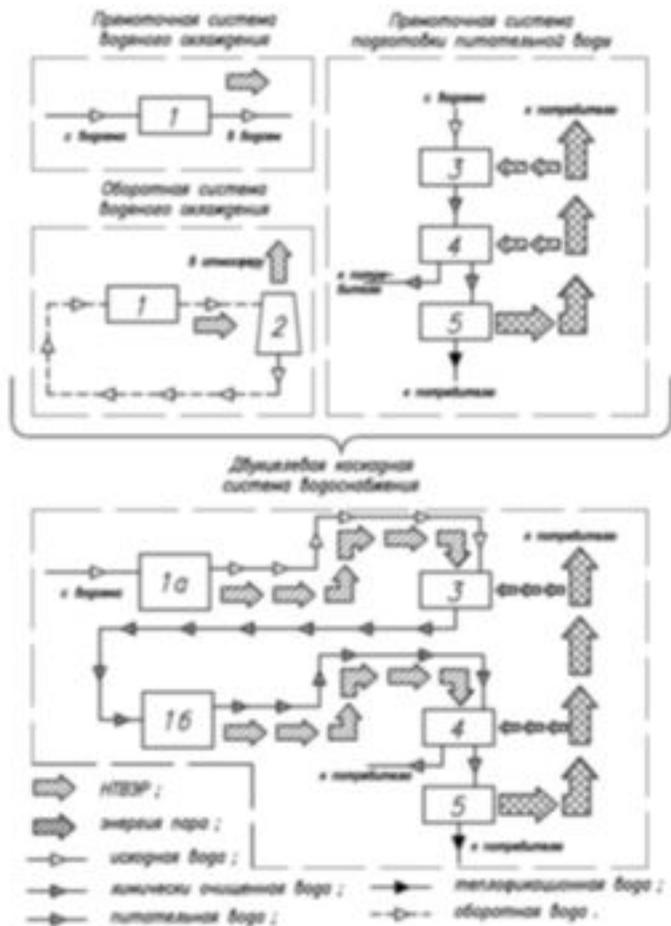
$C_{\text{нввср}}$  – средняя стоимость питательной воды на предприятии,  $\text{грн}/\text{м}^3$ ;

$C_{э/э}$  – годовая стоимость электроэнергии, затраченной на изменение направления движения воды в СППВ, грн;  
 $C_{э/эсп}$  – средняя стоимость электроэнергии на предприятии, грн/кВт·час;  
 $c$  – коэффициент, зависящий от способа прокладки сетей, грн/м;  
 $c_6$  – удельная теплоёмкость воды, кДж/кг·°С;  
 $d$  – наружный диаметр трубопровода, м;  
 $d_y$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  
 $e$  – коэффициент, зависящий от конструкции сетей, грн/м<sup>2</sup>;  
 $G$  – расход исходной воды СППВ, кг/с;  
 $H$  – суммарный рабочий напор, м;  
 $H_j^{(H)}$  – соответственно геометрические высоты всасывания и нагнетания, м;  
 $H_{jmp}^{(H)}, H_{jмест}^{(H)}$  – потери напора на трение и местные сопротивления участков всасывания и нагнетания  $j$ -го участка трубопровода, м;  
 $K_{эсп}$  – капитальные вложения в технологию с использованием НТВЭР, грн;  
 $K_{из}, K_{мс}$  – капитальные вложения соответственно в изоляцию и в тепловые сети, грн;  
 $k$  – количество участков трубопровода;  
 $L$  – общая длина теплопроводов утилизационной сети, м;  
 $l_j$  – длина  $j$ -го участка трубопровода, м;  
 $m_{\sigma_i}$  – массовый расход воды  $i$ -го РТ ТА, выбранного для одной из групп, кг/с;  
 $N$  – суммарная мощность, потребляемая насосами, кВт;  
 $n_{уд}$  – удельная норма потребления природного газа котлами, тыс.м<sup>3</sup>/ГДж;  
 $P_{ок}$  – срок окупаемости капитальных вложений, год;  
 $R^2$  – достоверность аппроксимации;  
 $S_{эк}$  – показатель стоимости сэкономленного топлива за год, грн;  
 $T$  – время работы насосов в году, час;  
 $t'_{\sigma_i}, t''_{\sigma_i}$  – соответственно температура воды на входе и выходе из  $i$ -го РТ ТА, выбранного для одной из групп, °С;  
 $t_w^{cp}$  – средняя за отопительный сезон температура теплоносителя, °С;

$t_{\sigma_3}^{cp}$  – средняя за отопительный сезон температура наружного воздуха, °С;  
 $Q_{эсп}$  – выход НТВЭР РТ ТА за год, кВт·час;  
 $Q_{m/n}$  – потери теплоты через изоляцию теплотрассы в течение отопительного периода, кВт·час;  
 $Q_{эк}$  – количество сэкономленной тепловой энергии на предприятии за год, ГДж;  
 $q_{эсп_i}$  – секундный выход НТВЭР после  $i$ -го РТ ТА, кВт;  
 $q_{m/n}$  – тепловые потери через изоляцию теплотрассы за отопительный период, кВт;  
 $q'_{m/n}$  – удельные тепловые потери через изоляцию теплотрассы за отопительный период, Вт/м;  
 $V$  – средняя скорость ветра за отопительный период, м/с;  
 $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изолированной теплотрассы к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\Delta P_{лj}$  – линейные потери давления на  $j$ -ом участке трубопровода, Па;  
 $\delta$  – толщина изоляции, м;  
 $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, Вт/(м·°С);  
 $\eta$  – КПД насосов;  
 $\tau_i$  – время работы  $i$ -го РТ ТА в году, час;  
 $\tau_{он}$  – продолжительность отопительного периода в году, час;  
АО – средняя норма амортизационных отчислений за год, грн;  
ЗП – заработная плата обслуживающего персонала за год, грн;  
НТВЭР – низкопотенциальные тепловые вторичные энергетические ресурсы;  
ОСС – отчисления в фонд социального страхования за год, грн;  
ПР – прочие расходы, связанные с обслуживанием утилизационной СППВ за год, грн;  
РТ – рекуперативный теплообменник;  
СВО – система водяного охлаждения;  
СППВ – система подготовки питательной воды;  
ТА – технологический агрегат;  
ТРС – текущий ремонт и содержание основных средств за год, грн;  
ЭЗ – эксплуатационные затраты;  
ЭММ – экономико-математическая модель.

Для обеспечения энергетической безопасности Украины необходимо сокращение потре-

ния первичных энергоресурсов теплоэнергетическими системами за счёт рационального исполь-



**Рис. 1. Концептуальное решение по использованию НТВЭР СВО.**

**1 – РТ ТА; 1а – низкопотенциальная группа РТ ТА; 1б – высокопотенциальная группа РТ ТА; 2 – градирня; 3 – узел химической водоочистки; 4 – узел деаэрации; 5 – теплогенерирующая установка.**

зования НТВЭР на промышленных предприятиях, что ставит перед современной наукой задачи поиска, обоснования и внедрения новых энергосберегающих способов. Кроме того, полезное использование НТВЭР снизит тепловую загрязнённость окружающей среды, что позитивно отразится на экологии страны.

В качестве объекта исследования принимается концепция способа комплексного использования НТВЭР прямоточных и оборотных СВО ТА для нужд теплоснабжения СППВ (рис. 1) [1], суть которой состоит в последовательном нагреве определенного объёма исходной воды сначала (перед узлом химической очистки 3) в группе низкопотенциальных РТ ТА 1а, а затем химически

очищенной воды (перед узлом деаэрации 4) в группе высокопотенциальных РТ ТА 1б. В результате происходит изменение принципа организации использования воды за счёт перехода от прямоточного (оборотного) водоснабжения РТ ТА и прямоточного водоснабжения СППВ к каскадному водоснабжению вышеуказанных объектов, вследствие чего изменяется направление движения теплоэнергетических потоков.

Но широкое использование данной концепции энергосберегающего способа комплексного использования НТВЭР на промышленных предприятиях Украины сдерживается отсутствием экономико-математического аппарата, позволяющего прогнозировать сроки окупаемости капитальных вложений в данную технологию [2].

К целям статьи относится разработка ЭММ прогнозирования окупаемости капитальных вложений в способ использования НТВЭР СВО технологических агрегатов, а также обоснование целесообразности использования разработанной технологии на промышленных предприятиях Украины на базе численного решения разработанной модели.

Ниже приводится математическое описание взаимосвязей параметров разрабатываемой ЭММ.

Срок окупаемости капитальных вложений в способы с использованием НТВЭР на промышленных предприятиях Украины определяется по формуле [3]:

$$P_{ок} = \frac{K_{вэр}}{S_{эк} - C_{вер}} \quad (1)$$

Ввиду того, что данная энергосберегающая технология предусматривает перенаправление теплоэнергетических потоков в существующих теплоэнергетических системах, капитальные вложения состоят из затрат на утилизационную тепловую сеть и затрат на её изоляцию.

$$K_{вэр} = K_{мс} + K_{из} \quad (2)$$

Вышеперечисленные затраты определяются по методике проф. Б. Л. Шифринсон [4]:

$$K_{мс} = c \sum_1^k l_j + e \sum_1^k d_j l_j, \quad (3)$$

$$K_{uz} = \pi L(a_u \delta(d + \delta) + a_n(d + 2\delta)). \quad (4)$$

Общая длина основной утилизационной магистрали состоит из длины участка теплосети от узла химической водной очистки до низкопотенциальной группы РТ ТА и длины участка теплосети от деаэрационной установки до высокопотенциальной группы РТ ТА. Диаметры вышеперечисленных участков аналогичные и определяются по номограммам согласно известному расходу исходной воды СППВ и задаваясь рекомендуемыми скоростями движения воды либо по формуле [4]:

$$d_j = 0,073 \frac{(3,6G)^{0,38} l_j^{0,19}}{\Delta P_{lj}^{0,19}}. \quad (5)$$

Показатель стоимости сэкономленного топлива определяется по формуле [3]:

$$S_{эк} = B_{эк}^m C^m = Q_{эк} n_{yd} C^m = (Q_{вэп} - Q_{m/n}) 3,6 \cdot 10^{-3} n_{yd} C^m. \quad (6)$$

Годовой выход НТВЭР РТ ТА определяется по формуле [3]:

$$Q_{вэп} = \sum q_{вэп_i} \tau_i = \sum m_{g_i} c_{g_i} (t''_{g_i} - t'_{g_i}) \tau_i. \quad (7)$$

Потери теплоты через изоляцию утилизационной теплотрассы в течение отопительного периода определяются по формуле [5]:

$$Q_{m/n} = q_{m/n} \tau_{on} = q'_{m/n} L \cdot 10^{-3} \tau_{on} = \frac{\ln \frac{t_w^{cp} - t_{воз}^{cp}}{d + 2\delta}}{\frac{d}{2\pi\lambda_{uz}} + \frac{1}{\pi\alpha_n(d + 2\delta)}} L \cdot 10^{-3} \tau_{on}. \quad (8)$$

$$\alpha_n = 21 + 1,4V. \quad (9)$$

тепловой энергии, вследствие использования НТВЭР определяется по формуле [6]:

$$C_{вер} = ЭЗ + ПР. \quad (10)$$

Эксплуатационные затраты энергосберегающей СППВ определяются с помощью формул:

$$ЭЗ = C_{э/э} + C_{нвс} + ЗП + ОСС + АО + ТРС, \quad (11)$$

$$ОСС = 0,1 \cdot ЗП, \quad (12)$$

$$АО = 0,06 \cdot K_{вэп}, \quad (13)$$

$$ТРС = 0,2 \cdot АО, \quad (14)$$

$$ПР = 0,03 \cdot ЭЗ. \quad (15)$$

Годовая стоимость электроэнергии, затраченной на изменение направления движения воды в утилизационной СППВ, определяется по формуле [7]:

$$C_{э/э} = C_{э/эсп} TN = C_{э/эсп} T \frac{GH}{102\eta} = C_{э/эсп} T \frac{G \sum H_j^{e(n)} + h_{jмп}^{e(n)} + h_{jмест}^{e(n)}}{102\eta}. \quad (16)$$

Величина потерь напора на трение в стальных трубопроводах по удельным сопротивлениям определяется по формуле:

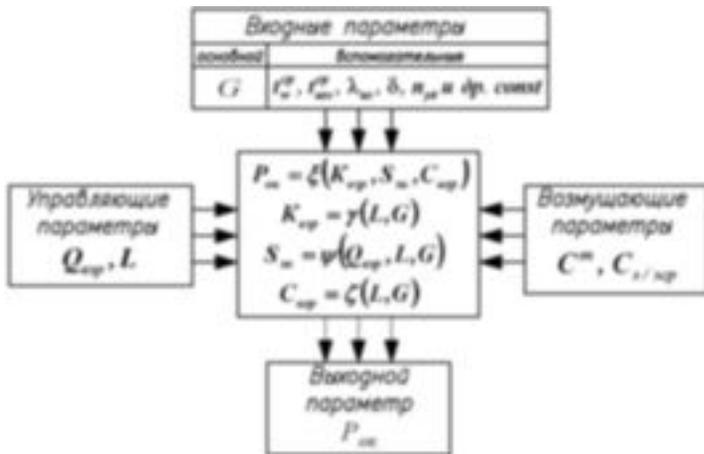
$$h_{jмп}^{e(n)} = AG^2 l_j^{e(n)} = \frac{0,001736}{d_y^{5,3}} G^2 l_j^{e(n)}. \quad (17)$$

Потери напора на местные сопротивления для водоводов длиной более 1000м принимаются в размере 5% от потерь на трение, для водоводов до 1000м – 10% от потерь на трение [7].

Годовая стоимость потерь питательной воды, вследствие увеличения объема СППВ, определяется по формуле:

$$C_{нвс} = \frac{L\pi d_y^2}{4} C_{нвсп}. \quad (18)$$

В результате анализа формулы (1) видно, что к “затратной” части исследуемой энергосберегающей технологии относятся показатели  $K_{вэп}$ ,  $C_{вер}$ , а к “прибыльной” части –  $S_{эк}$ . Наиболее значимые



**Рис. 2. Структурная схема ЭММ окупаемости капитальных вложений в энергосберегающий способ комплексного использования НТВЭР СВО.**

параметры, влияющие на вышеуказанные показатели, показаны на структурной схеме разработанной ЭММ (рис. 2).

В данной ЭММ присутствуют следующие допущения:

- расход исходной и химически очищенной воды для СППВ являются равными и постоянными величинами в течение года;

- общий нагрев исходной и химически очищенной воды соответственно в низкопотенциальной и высокопотенциальной группах РТ ТА составляет от 2 до 10 °С;

- годовая продолжительность работы РТ ТА НТВЭР составляет от 7500 до 8760 часов.

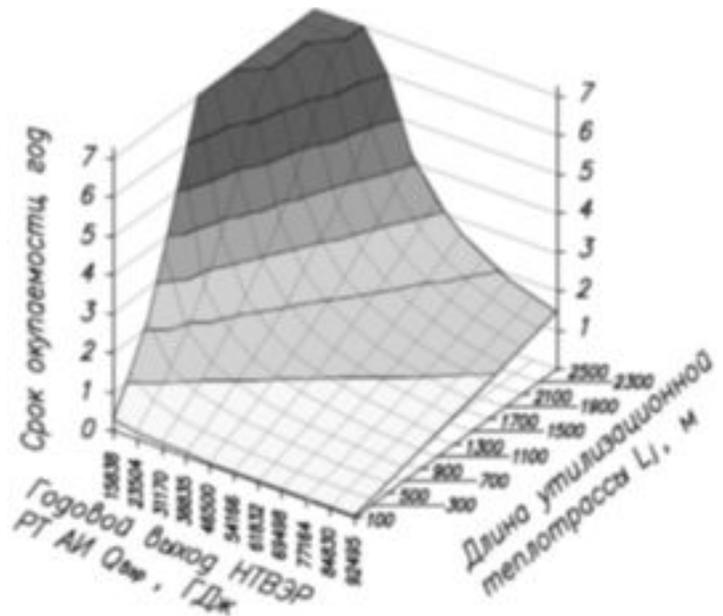
Исходя из вышеприведенных допущений, по формуле (7) определяются граничные условия на управляющий параметр модели – годовой выход НТВЭР. Граничные условия на второй управляющий параметр – протяженность утилизационной теплотрассы – принимаются в пределах от 100...2500 м.

В данной ЭММ присутствуют следующие ограничения:

- суммарный расход охлаждающей воды внутри низко- и высокопотенциальной группы выбранных РТ ТА должен быть не более расхода исходной воды СППВ;

- срок окупаемости данного энергосберегающего способа находится в пределах 7 лет.

Компьютерная реализация разработанной ЭММ (в ценах 2006 г.) осуществлялась при фик-



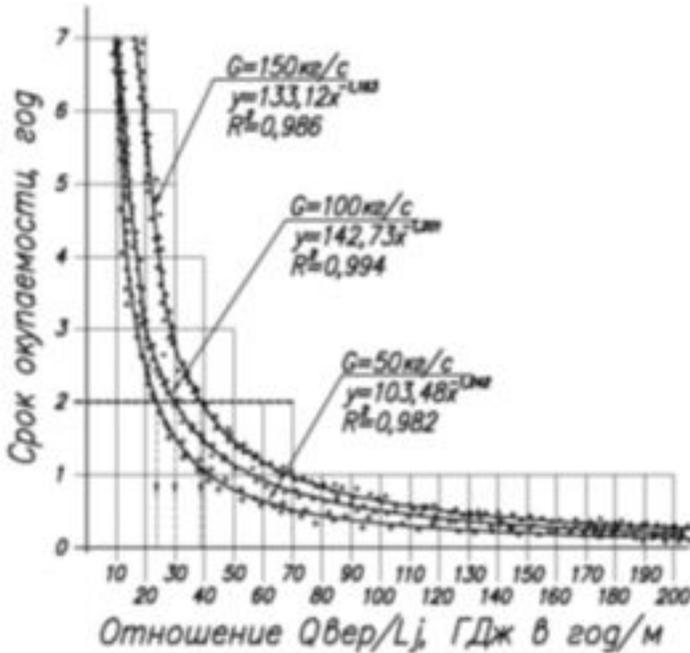
**Рис. 3. Зависимость срока окупаемости капитальных вложений в энергосберегающий способ использования НТВЭР СВО ТА для нужд теплоснабжения СППВ от общей длины теплопроводов утилизационной сети и годового выхода НТВЭР РТ ТА при  $G = 70$  кг/с.**

сированных входных, возмущающих параметрах и варьируемых управляющих параметрах в программном обеспечении Excel 2000. Графическая визуализация результатов компьютерной реализации разработанной ЭММ может быть представлена как в пространстве (рис. 3), так и в плоскости (рис. 4).

В результате проведенных исследований (рис. 4) установлена нелинейная зависимость выходного параметра модели (срока окупаемости капитальных вложений) от отношения управляющих параметров – соответственно годового выхода НТВЭР РТ ТА к общей длине теплопроводов утилизационной сети в виде степенной функции обратной пропорциональности  $y = a \cdot x^{-n}$ . Установлены коэффициенты данной функции для случаев водопотребления СППВ  $G = 50, 100$  и  $150$  кг/с с  $R^2$  соответственно 0,986, 0,994 и 0,982.

Результаты численного решения разработанной экономико-математической модели позволяют сделать вывод, что проектирование и последующее внедрение разработанной технологии со сроком окупаемости капитальных вложений 2 года и менее целесообразно для промышленных предприятий Украины с водопотреблением

## ЛИТЕРАТУРА



**Рис. 4.** Зависимость срока окупаемости капитальных вложений в энергосберегающий способ использования НТВЭР СВО ТА для нужд теплоснабжения СППВ от отношения годового выхода НТВЭР РТ ТА к общей длине теплопроводов утилизационной сети при  $G = 50, 100$  и  $150$  кг/с ( $y \equiv P_{ок}$ ,  $x \equiv Q_{вэр}/L$ ).

СППВ  $G = 50, 100$  и  $150$  кг/с при отношении годового выхода НТВЭР РТ ТА к общей длине теплопроводов утилизационной сети не менее соответственно 23, 30 и 39 ГДж в год/м.

К перспективам дальнейших поисков в данном направлении относится усовершенствование ЭММ при введении условия переменного водопотребления СППВ в динамике года.

1. Бузунов А.В. Методика оптимального выбора водоохлаждаемых рекуперативных теплообменников технологических агрегатов для подогрева исходной и химически очищенной воды при новой энергосберегающей технологии подготовки питательной воды // *Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України*. – Дніпропетровськ: “ПП Грек О.С.” – 2006. – С. 23 – 32.

2. Видяпин В.И. Бакалавр экономики: хрестоматия. – М.: Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова, Центр кадрового развития, Информационно-издательская фирма “Триада”, 1999. – Том 2. – 1056 с.

3. ДСТУ 4090 – 2001. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу та використання. – К.: Держстандарт України, 2002. – 25 с.

4. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П., Пронина И.Б., Слемзин В.А. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов ВУЗов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.

5. Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н., Терлецкая Е.Н. Теплоснабжение: Учебник для ВУЗов. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.

6. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. ВЭР чёрной металлургии и их использование. – К.: Вища шк. Головное из-во, 1988. – 328 с.

7. Справочник проектировщика водоснабжения населённых мест и промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 1967. – 382 с.