

# КРИТЕРІЙ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

V.KSHANOVSKIY

## CRITERION OF POWER EFFICIENCY OF AN ELECTRIC HEAT SUPPLY

**Анотація.** В статті розглянуто умови забезпечення теплопостачання за рахунок споживання електроенергії за умови неможливості збільшення загальносистемних енергетичних витрат.

Досліджено енергетичну ефективність виробництва, транспортування електроенергії та її акумулювання гідроаккумуляційною електростанцією. Також досліджено енергетичну ефективність опалення споруд органічним паливом та електричною енергією з використанням різних систем електричного опалення.

Порівняння енергетичної ефективності виробництва електроенергії та споживання палива і електроенергії для опалення приміщень

дало можливість запропонувати критерій енергетичної ефективності електричного теплопостачання.

Його формулювання: «Електричне теплопостачання енергетично ефективне тоді, і тільки тоді, коли кількість заміщеного ним органічного палива забезпечує можливість виробництва електроенергії в кількості більшій, ніж необхідно для забезпечення цього опалення та витрат при її транспортуванні до споживача».

**Ключові слова:** енергетична ефективність, електричне опалення, електричне теплопостачання.

**Анотация.** В статье рассмотрены условия обеспечения теплоснабжения за счет потребления электроэнергии при невозможности увеличения общесистемных энергетических затрат.

Исследована энергетическая эффективность производства, транспортировка электроэнергии и ее аккумуляция гидроаккумулирующей электростанцией. Также исследована энергетическая эффективность отопления сооружений органическим топливом и электрической энергией с использованием разных систем электрического отопления.

Сравнение энергетической эффективности производства электроэнергии и потребления топлива и электроэнергии для отопления помещений дало возможность предложить критерий энергетической эффективности электрического теплоснабжения.

Его формулирование: «Электрическое теплоснабжение энергетически эффективно тогда, и только тогда, когда количество замещенного им органического топлива обеспечивает возможность производства электроэнергии в количестве большем, чем необходимо для обеспечения этого отопления и потерь при ее транспортировке к потребителю».

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, электрическое отопление, электрическое теплоснабжение.

**Annotation.** It is considered conditions of maintenance of a heat supply at the expense of a current consumption under condition of impossibility to increase general system power expenses.

The power production efficiency, transportations of the electric power and its accumulation by heat-sink power station is investigated. Also power efficiency of heating of constructions by organic fuel and electric energy with use of different systems of electric heating is investigated.

Comparison of a power production efficiency of the electric power, and also consumption of fuel and the electric power for heating of premises, has given the chance to offer criterion of power efficiency of an electric heat supply.

Its formulation: «the Electric heat supply is energetically effective then, and only when the quantity of the organic fuel replaced with it provides possibility of manufacture of the electric power in quantity, sufficient for maintenance of this heating and losses at its transportation to the consumer».

**Key words:** efficiency, electric heating, electric heat supply.

### Постановка задачі

Поширення електричного теплопостачання в Україні набуває нездорового характеру. В сільській побут масово впроваджуються споживання електричної енергії з метою електроопалення та постачання гарячою водою шляхом перетворення електричної енергії в теплову безпосередньо в момент споживання тепла. При цьому технології з акумуляцією та трансформацією тепла ігноруються через більшу капіталомісткість їх впровадження. Крім того, у вартості енергоносіїв та енергії різну, але суттєву частку становлять дотації та субвенції, величина яких визначається не економічними, а поточними політичними чинниками. Оскільки значна частина енергії споживається саме з метою забезпечення приміщень теплом, це призводить до дезорієнтації інвесторів, які вкладають кошти в модернізацію систем теплопостачання для підвищення їх економічної ефективності.

На економічну ефективність системи теплопостачання також впливає технічний прогрес, поступово змінюючи оточення, з яким вона взаємодіє. В прогнозованому майбутньому, після вводу в експлуатацію запланованих потужностей ГАЕС, амплітуда нерівномірності графіка навантаження ОЕСУ різко зменшиться. Електричне теплопостачання з акумулюванням тепла, опалення – зимою, а гаряче водопостачання – влітку, буде конкурувати за енергоресурс з гідроаккумуляцією. Це знайде відображення в змінах тарифної політики енергопостачання та правил користування електроенергією. При цьому технології енергопостачання, енергетично менш ефективні, ніж енергопостачання з гідроаккумуляванням електроенергії, на енергоринку будуть поставлені в економічно не вигідні умови.

І тому перед інвесторами постає проблема визначення критерію надійності капіталовкладень в модернізацію систем теплопостачання споруд. Додаткову актуальність цій проблемі надає необхідність проведення цієї модернізації у великих обсягах та в стислі терміни.

Економічна ефективність об'єкта капіталовкладень в енергозбереження визначається їх обсягом, необхідним для досягнення поставленої мети та обсягом поточних витрат, пов'язаних з її реалізацією [1]. Оскільки термін реалізації мети, тобто забезпечення теплом споруди, мінімум на порядок перевищує термін її досягнення, тобто будівництва чи модернізації системи теплопостачання, то надійність визначення варіанта ефективного капіталовкладення в модернізацію чи будівництво системи теплопостачання зводиться до надійності оцінки майбутніх поточних витрат на теплопостачання протягом великого проміжку часу.

Енергія та енергоносії відносно потреби у теплопостачанні є взаємно заміщальними товарами. Тому на великих відрізках часу тимчасові відхилення у співвідношенні їх цін та тарифів в ринковій економіці взаємно компенсуються, і середня величина співвідношення цих величин відповідає співвідношенню ефективностей задоволення потреби у забезпеченні теплом. Завдяки цьому можливо запобігти втратам капіталовкладень в проекти модернізації систем теплопостачання, орієнтуючись не на поточну вартість енергозабезпечення, а на енергетичну ефективність системи теплопостачання.

Існуюча методика як показник енергетичної ефективності пропонує величину витрат енергії

первинного органічного палива, необхідну для електроопалення, скориговану на частку виробництва електроенергії атомними енергоблоками. Але ця частка чомусь розрахована не за енергетичним, а за економічним показником – вартістю електроенергії атомних електростанцій [2]. Крім того, розрахунок цих витрат, у зв'язку з багатостадійністю та інваріантністю його перетворень в енергію, складний. І тому, для забезпечення надійної оцінки ефективності інвестицій в галузі теплопостачання, виникає потреба у пошуку критерію енергетичної ефективності, простішого в розрахунку та більш коректного відносно законів фізики та економіки.

### Результати досліджень

Якщо використання електричного теплопостачання в побуті та комунальному господарстві призводить до заміщення в споживанні органічного палива, то заміщене паливо споживається тепловою енергетикою з метою забезпечення електроенергією електронагрівальних приладів систем теплопостачання.

Питома величина заміщення палива при електричному теплопостачанні, тобто кількість умовного палива, заміщеного в результаті споживання одиниці електроенергії з метою теплопостачання

$$m_3 = \frac{M_{cn}}{Q_{cn}}, \quad (1)$$

де  $M_{cn}$  – кількість палива, заміщеного в результаті використання електричного теплопостачання в довільно вибраному періоді навантаження;

$Q_{cn}$  – кількість електроенергії, спожитої для теплопостачання в цьому періоді навантаження.

Кількість палива, необхідна для виробництва одиниці електроенергії з доставкою до місця її споживання, становить:

$$b_c = \frac{b_0}{(1-k_1)(1-k_2)}, \quad (2)$$

де  $b_0$  – питомі витрати умовного палива в енергосистемі на відпуск електричної енергії в магістральні мережі [3];

$k_1$  – коефіцієнт технологічних втрат електричної енергії в магістральних мережах [4];

$k_2$  – коефіцієнт нормативних технологічних втрат електричної енергії в розподільчих мережах енергопостачальних компаній.

Додаткові втрати енергії при її транспортуванні зумовлюють більші витрати палива на виробництво одиниці електроенергії, поставленої споживачеві. Коефіцієнт зміни витрат палива на одиницю електроенергії при її транспортуванні до споживача становить:

$$k_{mp} = \frac{b_c}{b_0} = \frac{1}{(1-k_1)(1-k_2)}. \quad (3)$$

Кількість палива, необхідна для виробництва одиниці електроенергії з її передачею магістральною мережею, акумуляцією гідроакумулюючою електростанцією та наступною поставкою в магістральну мережу:

$$b_a = \frac{b_0}{(1-k_1)\eta}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії ГАЕС.

Додаткові втрати енергії при її акумулюванні зумовлюють більші витрати палива на поставку в мережу одиниці акумульованої електроенергії. Коефіцієнт зміни витрат палива на одиницю електроенергії при її акумулюванні ГАЕС становить:

$$k_a = \frac{b_a}{b_0} = \frac{1}{(1-k_1)\eta}. \quad (4)$$

Кількість палива, необхідна для виробництва одиниці надлишкової електроенергії в провалі навантаження, доставленої до місця її споживання зі зберіганням в ГАЕС, становить:

$$b_{ac} = b_0 k_{mp} k_a. \quad (5)$$

За умов надлишку енергії в провалі навантаження, тобто нестачі акумуляційних потужностей чи ємностей, її додаткове споживання призводить до зменшення регуляційних втрат енергії та енергоносіїв в системі енергопостачання. Ці втрати не менші, ніж втрати при системному акумулюванні енергії, доказом чого є будівництво гідроакумулювальних електростанцій.

При надлишку потужності та ємності системних акумуляторів додаткове споживання електроенергії в провалі навантаження призводить до зменшення акумуляційних втрат енергії при її акумулюванні. Поява в енергосистемі споживачів-акумуляторів, наприклад, теплоакумулювальних нагрівачів води, що споживають електроенергію виключно в період провалу, призводить до зменшення завантаження в провалі ГАЕС та запобігає втратам при системному акумулюванні тієї частки надлишкової енергії, яка отримана такими споживачами. При цьому зменшення витрат палива в енергосистемі на поставку електроенергії до споживача становить:

$$\Delta b = b_{ac} - b_c = b_0 k_{mp} k_a - b_0 k_{mp} = b_0 k_{mp} (k_a - 1), \quad (6)$$

а коефіцієнт зміни витрат палива в енергосистемі при споживчому акумулюванні енергії чи її споживанні виключно в період провалу:

$$k_{np} = \frac{b_{ac}}{b_c} = \frac{1}{k_a} = (1 - k_1)\eta. \quad (7)$$

І тому поставка додаткової надлишкової одиниці енергії у період провалу до споживача спричинить в енергосистемі додаткове споживання палива в кількості:

$$b_{np} = b_0 k_{mp} k_{np}. \quad (8)$$

Відношення кількості палива, заміщеного за рахунок споживання одиниці електроенергії, до кількості палива, спожитого на її виробництво – це показник енергетичної ефективності електричного тепlopостачання  $\beta$ .

У період напівпікового навантаження, коли для тепlopостачання споживається електроенергія, не акумульована та не призначена для акумулювання, величина енергетичної ефективності електричного тепlopостачання:

$$\beta_{np} = \frac{m_3}{b_c} = \frac{m_3}{b_0 k_{mp}}. \quad (9)$$

У період пікового навантаження відбувається споживання для тепlopостачання електроенергії, акумульованої ГАЕС. При цьому втрати енергії в енергосистемі збільшуються, і тому величина енергетичної ефективності електричного тепlopостачання змінюється з урахуванням величини коефіцієнта  $k_a$ :

$$\beta_{nik} = \frac{m_3}{b_{ac}} = \frac{m_3}{b_0 k_{mp} k_a}. \quad (10)$$

У період провалу відбувається споживання для тепlopостачання електроенергії, призначеної для акумуляції гідроакумулювальними електростанціями. При цьому втрати електроенергії в енергосистемі, завдяки споживчому акумулюванню, зменшуються, і тому величина енергетичної ефективності електричного тепlopостачання змінюється з урахуванням величини коефіцієнта  $k_{np}$ :

$$\beta_{np} = \frac{m_3}{b_{np}} = \frac{m_3}{b_0 k_{mp} k_{np}}. \quad (11)$$

В загальному випадку система тепlopостачання має теплову ємність, яка забезпечує зміщення в часі процесів постачання тепла, тобто споживання електроенергії для його виробництва, та споживання теплової енергії. При цьому характер споживання електроенергії в різні періоди навантаження може бути суттєво різним. І тому аналіз процесів заміщення палива електричною енергією слід проводити для кожного періоду навантаження окремо, але питому величину заміщення слід визначати для системи тепlopостачання в цілому.

Якщо кількість палива, заміщеного електричним тепlopостачанням, буде не меншою від кількості палива, спожитого з метою електричного тепlopостачання, то енергетична ефективність сукупності систем тепlopостачання та об'єднаної енергосистеми не зменшиться. І тому критерієм енергетичної ефективності електричного тепlopостачання є

$$\beta \geq 1. \quad (12)$$

З урахуванням цього критерію енергетична ефективність електричного тепlopостачання буде забезпечена за таких величин заміщення палива:

в напівпіковий період

$$m_3^{nn} \geq b_0 k_{mp}, \quad (13)$$

в піковий період

$$m_3^{nik} \geq b_0 k_{mp} k_a, \quad (14)$$

в період провалу

$$m_3^{np} \geq b_0 k_{mp} k_{np}. \quad (15)$$

Система електричного тепlopостачання споживає електроенергію в різні добові періоди навантаження енергосистеми або обліку споживання електроенергії, в загальному випадку, з різною середньою величиною потужності. При багатозонному обліку споживання електроенергії питома величина заміщення палива:

$$m_3 = \sum_i m_3^i \frac{Q_i}{Q_{заг}}, \quad (16)$$

де  $Q_{заг}$  – загальна кількість електроенергії, спожитої для тепlopостачання;

$Q_i$  – кількість електроенергії, спожитої для тепlopостачання в  $i$ -й період обліку споживання;

$m_3^i$  – питома величина заміщення органічного палива в  $i$ -му періоді обліку споживання.

При розподілі споживання на три періоди загальна питома величина заміщення органічного палива становить:

$$m_3 = m_3^{nik} \frac{Q_{nik}}{Q_{заг}} + m_3^{nn} \frac{Q_{nn}}{Q_{заг}} + m_3^{np} \frac{Q_{np}}{Q_{заг}}, \quad (17)$$

де  $Q_{np}$  – кількість електроенергії, спожитої для тепlopостачання в період провалу навантаження;

$Q_{nn}$  – кількість електроенергії, спожитої для тепlopостачання в період напівпікового навантаження;

$Q_{nik}$  – кількість електроенергії, спожитої для тепlopостачання в період пікового навантаження;

$m_3^{np}$  – питома величина заміщення органічного палива в період провалу навантаження;

$m_3^{nn}$  – питома величина заміщення органічного палива в період напівпікового навантаження;

$m_3^{nik}$  – питома величина заміщення органічного палива в період пікового навантаження.

З урахуванням рівнянь (13),(14),(15) та (17) умова середньорічної енергоефективності для системи тепlopостачання, яка споживає електроенергію в кожному з періодів навантаження:

$$m_3^{rik} \geq \frac{b_0 k_{mp}}{Q_{заг}^{rik}} \left[ Q_{np}^{rik} k_{np} + Q_{nn}^{rik} + k_a Q_{nik}^{rik} \right] = m_3^{\min}, \quad (18)$$

де змінні з індексом «*рік*» відносяться до споживання електроенергії та заміщення палива протягом року.

На рис.1 наведено графіки, розраховані за формулою (18), що відображають мінімальну величину питомого заміщення органічного палива для систем електричного теплопостачання, які задовільняють вимогу критерію енергетичної ефективності (12). Графіки відображають величину заміщення палива, яка забезпечує мінімальну енергетичну ефективність системи електротеплопостачання, підключеної до розподільчих мереж 0,4 кВ.

Вихідні дані для розрахунку величин, відображених на графіках рис. 1, наведені в табл. 1.

З графіків рис.1 видно, що найменше значення мінімальної ефективної величини заміщення характерне для систем, що здійснюють теплопостачання виключно за рахунок споживання електроенергії в провалі навантаження. При цьому його величина є нижчою від питомих витрат палива на виробництво електроенергії в енергосистемі, але інтенсивно збільшується зі збільшенням споживання електроенергії в періоди напівпікового та пікового навантаження.

З урахуванням (9), (10), (11) та (18) середньорічна енергетична ефективність електричного теплопостачання

$$\beta^{рік} = \frac{m_3^{рік}}{b_0 k_{тр} Q_{заг}^{рік}} \left[ \frac{Q_{пр}^{рік}}{k_{пр}} + Q_{нп}^{рік} + \frac{Q_{пк}^{рік}}{k_a} \right]. \quad (19)$$

Таблиця 1

Параметр	Величина
Питомі витрати умовного палива на виробництво електричної енергії $b_0$ , кг у.п./кВт-год [3]	0,395
Коефіцієнт технологічних втрат електричної енергії в магістральних мережах НЕК «Укренерго» $k_1$ [4]	0,026
Коефіцієнт нормативних технологічних витрат електричної енергії в розподільчих мережах енергопостачальних компаній $k_2$ [3]	0,12
Коефіцієнт корисної дії ГАЕС $\eta$ [5]	0,75

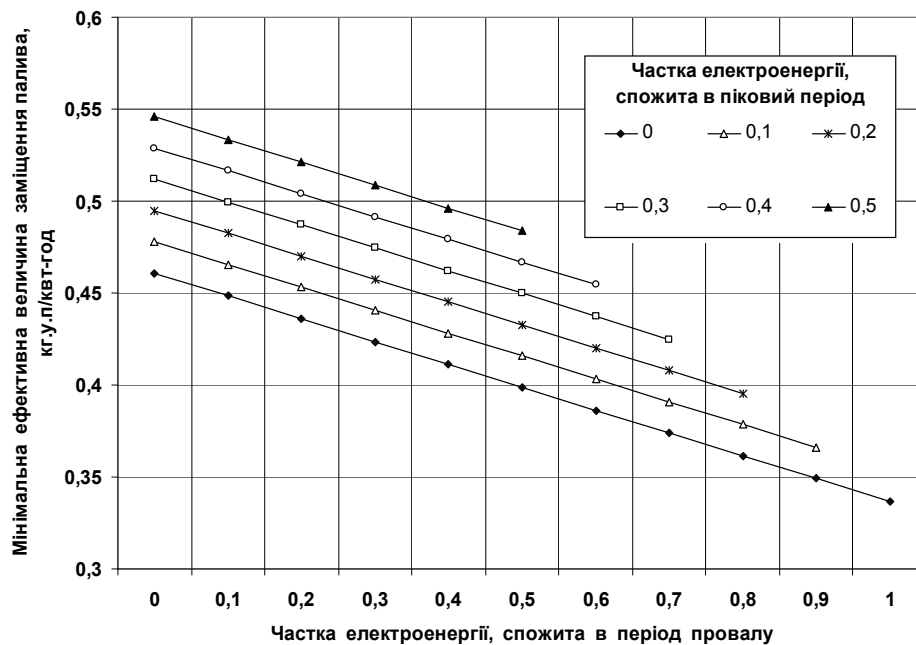


Рис.1. Залежність мінімальної величини заміщення органічного палива при електричному теплопостачанні, необхідної для забезпечення його енергетичної ефективності, від співвідношення частин його споживання в різні періоди навантаження енергосистеми

Енергоефективність теплопостачання слід відрізняти від енергоефективності теплозабезпечення. Теплопостачання та тепловикористання є складовими процесу

теплоспоживання споруди. І тому необхідно розрізняти енергетичну ефективність теплопостачання та енергетичну ефективність використання тепла.

Покращення теплоізоляційних властивостей споруд, рекуперація тепла і т.ін. заходи підвищують енергоефективність тепловикористання. При цьому теплопотреби зменшуються незалежно від джерела тепла. А використання теплових насосів, променевої теплопередачі, підвищення точності регулювання температури, теплозабезпечення в заданому місці з дотриманням змінного в часі температурного режиму, різні організаційно-технічні заходи з використанням особливостей систем теплопостачання [6] – це підвищення енергоефективності постачання енергії до споживача. І тому енергоефективність теплопостачання не може бути покращеною шляхом утеплення приміщення, як і енергоефективність тепловикористання не покращується з встановленням котла з більшим ККД. Реалізація заходів з утеплення приміщень призведе до зменшення споживання в однаковій пропорції як органічного палива, необхідного для їх опалення, так і електроенергії, необхідної для заміщення цього палива. А реалізація заходів з покращення умов теплогенерації призведе до зменшення витрат палива в однаковій пропорції при опаленні неутеплених та якісно утеплених приміщень.

Для перевірки можливості реалізації електричного теплопостачання, яке відповідає критерію енергетичної ефективності, в школі с. Копачівка Хмельницької області встановлено систему теплоаккумуляційного панельно-променевого електроопалення «Електропик» з регулюванням температури за робочим графіком по добовому циклу.

Проведено аналіз роботи протягом двох опалювальних сезонів попередньої системи електроопалення, що була замінена, нової системи «Електропик» та встановленої в сусідній школі с. Суслівці теплоаккумуляційної системи електроопалення «Теплий пол». При встановленні систем електроопалення в обох школах заходи з додаткового утеплення приміщень не проводились.

Результати аналізу наведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що системи теплоаккумуляційного електроопалення можуть відповідати критерію енергоефективності. Крім того, аналіз показує, що показник енергоефективності реальної системи прямого електроопалення, тобто водяної системи опалення з електричними котлами є вкрай низьким, тоді як теплоаккумуляційне електроопалення або відповідає, або ж близьке до вимоги критерію енергоефективності.

Таблиця 2

Об'єкт – сільська школа в Хмельницькій області	Назва села		
	Суслівці	Копачівка	
Роки експлуатації	2003-2005	2003-2005	1997-1999
Об'єм споруди, м <sup>3</sup>	10989	6225	
Тип системи електроопалення	«Теплий пол»	«Електропик»	електро-котельня
Середньорічне споживання електроенергії для опалення, кВт·год за сезон, всього	275430	115995	432000
в т.ч. в період пікового навантаження	0	0	Однотарифний облік
в т.ч. в період напівпікового навантаження	57090	4080	
в т.ч. в період провалу навантаження	218340	111915	
Норматив витрат палива на сезон, кг у.п./м <sup>3</sup> за сезон	7,01	7,63	
Нормативні витрати палива, кг у.п./сезон	77033	47497	
Фактичне заміщення палива, кг у.п./кВт·год, ф. (1)	0,280	0,409	0,110
Величина заміщення органічного палива, необхідна для енергоефективності електроопалення, ф. (18)	0,363	0,341	0,461
<b>Критерій енергоефективності <math>\beta^{Pik}</math>, ф. (19)</b>	<b>0,785</b>	<b>1,203</b>	<b>0,239</b>

Примітка. Джерела вихідної інформації для розрахунків, наведених в таблиці – нормативний документ [7] та листи відділів освіти райдержадміністрацій

### Висновки

1. Система електричного теплопостачання (опалення, ГВП) є енергетично ефективною тільки в тому випадку, коли її впровадження призведе до зменшення споживання органічного палива в кількості не меншій, ніж його потрібно для виробництва та передачі до місця споживання електроенергії в обсязі, необхідному для нормальної роботи цієї системи протягом цього ж часу. Впровадження систем електричного теплопостачання, у яких величина питомого

- заміщення органічного палива є нижчою від питомих витрат палива на виробництво електроенергії, призведе до зниження ефективності енергетичної системи в цілому.
2. Енергетичну ефективність теплопостачання за рахунок споживання електроенергії необхідно визначати з урахуванням енергоефективності системних акумуляторів енергії, в провалі – враховуючи споживання електроенергії на їх зарядку, в період пікового навантаження – враховуючи необхідність забезпечення електроенергією додаткових споживачів, якими є системи теплопостачання, за рахунок розрядження цих акумуляторів.
  3. Після вводу в експлуатацію запланованих потужностей ГАЕС умови використання систем електричного теплопостачання з енергоефективністю, нижчою від енергоефективності електропостачання з використанням гідроакумуляції, значно погіршаться.
  4. Запропонований критерій енергоефективності електричного теплопостачання залежить від енергетичних параметрів систем з великим терміном експлуатації – засобів генерації, транспортування та акумуляування електроенергії. Ці параметри мало змінюються протягом всього періоду використання таких систем, і тому запропонований критерій є надійним орієнтиром у виборі напрямку довготермінового інвестування енергозберігальних заходів.

### **Література**

1. ДСТУ 2155-93 «Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню».
2. Пырков В.В. Электрические кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление. К. ООО «Издательский дом Дмитрия Бурого», 2004, 88 с.
3. Інформаційна довідка про основні показники роботи енергогенеруючих компаній та електростанцій НАК „Енергетична компанія України” за 2008 рік (<http://www.ecu.gov.ua/ua/activity/stat.html>).
4. Несальдоване надходження та втрати електроенергії в мережах 800-220 кВ НЕК "Укренерго" у 2008 році (<http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/>).
5. Takase Mitsuo, Okada Massuasuu, Inane Hisao. Field test result of large capacity pump-turbines to USA.– Hitachi Reviev, 1974,vol 23, №8.
6. А.В.Праховник, С.М.Іншеков. Ефективне енерговикористання в Україні: основні проблеми та шляхи їх вирішення. Управління енерговикористанням. Збірник доповідей / За заг.редакцією д.т.н. проф.Праховника А.В. К. Альянс за збереження енергії, 2001, 568с, С.19-34.
7. КТМ 204 України 244-94 «Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні». Керівний технічний матеріал Держжитлокомунгоспу від 14.12.93р. К. ЗАТ «ВІПОЛ», 2004, 376с.