

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.182

**М.Є. БАБІН, Р.В. ГРИГОР'ЄВ, С.В. ДУБОВСЬКИЙ, А.П. ЛЕВЧУК**  
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

## РІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА ІНДИВІДУАЛЬНИМИ ГАЗОВИМИ КОТЛАМИ

*У статті наведено формули для орієнтовної оцінки сезонної ефективності побутових газових котлів, що працюють у циклічному режимі. Обґрунтовано необхідність впровадження в Україні гармонізованих міжнародних стандартів, що регламентують дослідне визначення теплових втрат експлуатаційної готовності таких котлів, порядок розрахунку середньорічної ефективності їхньої роботи в умовах України та обов'язкове надання цих параметрів у паспортних даних котлів вітчизняного та зарубіжного виробництва.*

*Ключові слова:* середньорічна, втрати, індивідуальна, система, сезонні, теплопостачання, газ, котли, експлуатаційна, готовність

Системи індивідуального опалення відіграють помітну роль у загальному паливно-енергетичному балансі України і особливо – у балансі природного газу. Фактично весь природний газ власного видобутку обсягом близько 19 млрд  $\text{nm}^3$  на рік, за винятком 4–5 млрд  $\text{nm}^3$ , що витрачаються на потреби приготування продуктів харчування, спалюється населенням в індивідуальних (поквартирних) генераторах теплової енергії – малих котлах та пічках, більшість із яких є морально і фізично зношеними.

У зв'язку з відносно низькими цінами на природний газ для населення (порівняно з цінами для підприємств комунальної теплоенергетики) останніми роками в Україні спостерігається значне зростання ринку сучасних поквартирних газових котлів, річний обсяг продажу яких досягнув 800 тис. од. [1]. Це явище слід було б сприймати як таке, що сприяє ефективності використання природного газу, якби нові котли у повному обсязі використовувалися для заміщення котлів і пічок застарілих конструкцій.

Однак сьогодні ці котли встановлюють не тільки в індивідуальних будинках, не підклю-

чених до систем централізованого теплопостачання (СЦТ), але й у будинках, розташованих у зоні дії існуючих СЦТ. Багато фахівців порушують питання щодо доцільності масового використання малих котлів саме у цьому секторі теплопостачання, зокрема у багатоквартирних будинках [2].

Відповідні обґрунтування нерідко базуються на порівнянні систем індивідуального теплозабезпечення (СІТ) з існуючими СЦТ не лише за фінансовим ефектом, який за існуючих цін на природний газ у більшості випадків є беззаперечним, але й за показниками енергетичної ефективності. Однак при цьому в якості основного показника ефективності СІТ найчастіше використовуються паспортні значення ККД саме поквартирних котлів, тоді як для СЦТ – середньостатистичні показники ефективності котельних і втрат у магістральних і розподільних теплових мережах [3, 4]. Результати таких порівнянь майже завжди свідчать про беззаперечні переваги поквартирного опалення. Однак існують певні сумніви.

Відомо, що коректне порівняння тих чи інших теплогерел систем теплозабезпечення можливе тільки на основі зіставлення середньорічних показників ефективності використання палива. Саме такий порядок порівняння регламентується стандартами ЄС, США та

© М.Є. БАБІН, Р.В. ГРИГОР'ЄВ, С.В. ДУБОВСЬКИЙ,  
А.П. ЛЕВЧУК, 2010

інших країн світу, де річна ефективність використання палива є основним показником ефективності теплогерел. Наприклад, у США цей показник визначається терміном AFUE (Annual Fuel Utilization Efficiency) [5].

У вітчизняній літературі аналогом AFUE можна вважати середньорічний коефіцієнт ефективності використання палива (КВП). Однак порядок визначення та використання цього показника для побутових котлів у чинних нормативно-технічних документах України опрацьований недостатньо.

У зв'язку з цим під час розв'язання задач техніко-економічного порівняння систем централізованого та децентралізованого теплопостачання виникає необхідність так чи інакше оцінити фактичний річний КВП індивідуальних котлів. Отже, спробуємо зробити це на основі наявних технічних даних котлів малої потужності.

Однією із характерних особливостей побутових котлів індивідуального призначення є циклічний режим використання, оскільки для регулювання температури нагрівання води у таких котлах застосовуються регулятори прямої дії, які працюють з періодичним включенням/виключенням пальників котла.

Циклічність роботи супроводжується певною втратою ефективності порівняно з режимом довготривалої стаціонарної роботи. Циклічна робота котла зумовлює додаткові витрати палива на компенсацію втрат тепла у періоди від виключення до включення його пальників. У ці періоди котел перебуває у стані готовності до пуску, тому відповідні втрати іменуються у літературі втратами експлуатаційної готовності.

Загальний аналіз ефективності роботи котлів малої потужності впродовж року з урахуванням втрат експлуатаційної готовності, а також фізичні тлумачення цього показника наведені у роботах Г. Вагнера "Экономические показатели современных котельных установок" та "Обеспечение горячей водой вне отопительного периода" [6, 7]. Зокрема, сформульовано основні залежності для розрахунку річного КВП побутового котла з урахуванням ступеню його навантаження. Основні аналітичні положення цих робіт, за допомогою яких доволі просто визначити фізичний зміст втрат експлуатаційної готовності, розглядаються нижче.

Тепловий баланс котла у тривалому стаціонарному режимі роботи за певний проміжок часу  $\tau_p$  визначається за таким рівнянням:

$$B \cdot \tau_p = Q + (Q_1 + Q_5) \cdot \tau_p, \quad (1)$$

де  $B$  – теплова потужність котла по паливу (кВт);

$Q$  – корисний відпуск тепла (кВт·год);

$Q_1$  – теплова потужність втрат з вихідними газами (кВт);

$Q_5$  – теплова потужність втрат від зовнішнього охолодження котла (кВт);

$\tau_p$  – кількість годин, коли пальники котла працюють.

Тепловий баланс котла за період часу  $\tau_o > \tau_p$  його роботи у стаціонарно-періодичному (циклічному) режимі з автоматичною підтримкою сталої температури теплообмінної поверхні має вигляд:

$$B' \cdot \tau_p = Q + (Q_1 + Q_5) \cdot \tau_p + Q_b \cdot \tau_c, \quad (2)$$

де  $B'$  – теплова потужність котла по паливу у циклічному режимі (кВт);

$Q_b$  – тепловий потік втрат експлуатаційної готовності (кВт);

$\tau_c$  – час перебування котла у стані експлуатаційної готовності (год).

Ефективність роботи котла за весь період часу  $\tau_o = \tau_p + \tau_c$  визначається за формулою:

$$\eta = \frac{Q}{B' \cdot \tau_p} = \frac{Q}{B \cdot \tau_p + Q_b \cdot \tau_c} = \frac{\eta_k}{1 + q_b \cdot \frac{\tau_c}{\tau_p}}, \quad (3)$$

де  $\eta_k = \frac{Q}{B \cdot \tau_p}$  – ККД котла під час неперервного стаціонарного режиму роботи;

$q_b = \frac{Q_b}{B}$  – питома теплова втрата експлуатаційної готовності.

Сумарна кількість годин роботи котла визначається за його відомою потужністю:

$$\tau_p = \frac{Q}{P}, \quad (4)$$

де  $P$  – номінальна потужність котла (кВт).

При цьому:

$$\frac{\tau_c}{\tau_p} = \frac{\tau_o - \tau_p}{\tau_p} = \frac{1}{\varphi} - 1, \quad (5)$$

де  $\varphi = \frac{Q}{\tau_o \cdot P}$  – коефіцієнт використання встановленої потужності котла (КВВП).

Таким чином, у кінцевому вигляді вираз для експлуатаційного ККД котла має вигляд [6]:

$$\eta = \frac{\eta_k}{1 + q_b \cdot \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)}. \quad (6)$$

Відповідно до технічних стандартів ЄС (EN 303) питома втрата експлуатаційної готовності визначається як один із основних параметрів ефективності, обов'язковий до включення в основні технічні характеристики котлів побутового призначення. Цими ж стандартами регламентується нескладна процедура експериментального визначення втрати готовності на працюючому котлі. Згідно [6, 7] вона зводиться до наступного.

Котел відключається від контурів опалення і гарячого водопостачання, і його температура доводиться до певного нормативного рівня. У топці котла створюється певне нормоване розрідження. Після цього котел залишається у роботі на певний період часу  $\tau_0$  (до 48 год), працюючи в циклічному режимі з автоматичною підтримкою постійної температури власної теплообмінної поверхні. За результатами експерименту визначається спочатку загальний час роботи пальників котла  $\tau_p$ , а потім – питома втрата експлуатаційної готовності за формулою:

$$q_b = \frac{\tau_p}{\tau_0}. \quad (7)$$

На жаль, технічними стандартами України втрати експлуатаційної готовності не регламентуються, і вітчизняні виробники не вказують ці дані. У технічних характеристиках котлів, що імпортуються в Україну, втрати експлуатаційної готовності вказуються лише у поодиноких випадках за бажанням виробника.

У зв'язку з відсутністю більш-менш повного масиву фактичних даних щодо втрат експлуатаційної готовності для основних типів побутових котлів, які застосовуються в Україні, для орієнтовного визначення цього показника залишається використовувати аналітичні оцінки.

Деякі міркування щодо орієнтовного визначення втрат експлуатаційної готовності за досяжними характеристиками роботи котлів наведено нижче.

Теплові втрати котла у періоди, коли пальники вимкнено, як і в умовах стаціонарної роботи, визначаються сумою втрат теплоти вихідних

газів і втрат зовнішнього охолодження. Фактичні значення цих втрат відмінні від відповідних втрат у робочому режимі, що можна врахувати певним коефіцієнтом змін втрат. Виходячи з цього, питому втрату експлуатаційної готовності можна представити загальною залежністю:

$$q_b = \alpha_1 \cdot q_1 + \alpha_5 \cdot q_5, \quad (8)$$

де  $q_1, q_5$  – питомі втрати тепла з відхідними газами та від зовнішнього охолодження в режимі тривалої стаціонарної роботи котла;

$\alpha_1, \alpha_5$  – коефіцієнти змін відповідних втрат у стані готовності.

При цьому орієнтовне визначення втрат експлуатаційної готовності зводиться до оціночних розрахунків відповідних коефіцієнтів зниження.

Розглянемо побутовий котел типової конструкції, робота якого заснована на природно-гравітаційному збудженні тяги – самотяги. Такі котли працюють під певним розрідженням, що виникає внаслідок різниці між густиною повітря, яке потрапляє у котел, та газоповітряної суміші, що видаляється через димар.

Під час роботи з включеними пальниками розрідження у котлі визначається за формулою:

$$\Delta p = g \cdot h \cdot (\rho_a - \rho_{yx}), \quad (9)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння (9,8 м/с<sup>2</sup>);

$h$  – висота димаря (м);

$\rho_a$  – щільність повітря, що надходить (кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_{yx}$  – щільність газів, що виходять (кг/м<sup>3</sup>).

У режимі готовності розрідження у котлі розраховується аналогічним чином:

$$\Delta p_b = g \cdot h \cdot (\rho_a - \rho_b), \quad (10)$$

де  $\rho_b$  – щільність повітря, що виходить (кг/м<sup>3</sup>).

Масові витрати газів у робочому стані та повітря у стані готовності визначаються з рівнянь гідравлічного опору газоповітряного тракту котла за формулами:

$$G = A \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{yx}}; \quad (11)$$

$$G_b = A \cdot \sqrt{\Delta p_b \cdot \rho_b}, \quad (12)$$

де  $A$  – індивідуальна гідравлічна константа котла.

Відповідні втрати тепла з газами, що виходять, становитимуть:

$$Q_1 = A \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{yx}} \cdot c_{yx} \cdot (T_{yx} - T_a); \quad (13)$$

$$Q'_1 = A \cdot \sqrt{\Delta p_b \cdot \rho_b} \cdot c_a \cdot (T_b - T_a). \quad (14)$$

Якщо врахувати у формулах (13) і (14) температурні залежності щільності газів і повітря, знехтувати різницею між значеннями питомої теплоємності газів і повітря та недогрівом повітря до температури котла у стані готовності, то формула для оціночного визначення коефіцієнта зниження втрат тепла з газами, що відходять, буде такою:

$$\alpha_1 = \frac{Q'_1}{Q_1} = \frac{T_{yx}}{T_b} \cdot \left( \frac{T_b - T_a}{T_{yx} - T_a} \right)^{3/2}. \quad (15)$$

Слід зазначити, що більш точне обчислення коефіцієнта зниження втрат без введення вищезазначених припущень не являє принципових складнощів і може бути здійснене для будь-якого котла за відомими методами теплового та гідравлічного розрахунку.

Що стосується коефіцієнта змін втрат тепла від зовнішнього охолодження, то його розрахунок є ускладненим навіть для конкретного котла з відомим конструктивним виконанням. У зв'язку з цим за відсутністю інших припущень відповідні втрати у режимі готовності слід вважати тими самими, що й під час нормальної стаціонарної роботи котла. При цьому  $\alpha_5 \approx 1$ , тож оціночна формула для розрахунку питомої витрати експлуатаційної готовності котлів з природно-гравітаційним збудженням тяги матиме такий вигляд:

$$q_b \approx q_5 + q_1 \cdot \frac{T_{yx}}{T_b} \cdot \left( \frac{T_b - T_a}{T_{yx} - T_a} \right)^{3/2}. \quad (16)$$

Значення температур у цій формулі надається за шкалою Кельвіна. Методична похибка формули, зумовлена прийнятими спрощеннями, оцінюється у 10 %; цього достатньо для орієнтовних розрахунків.

Грубо орієнтовне визначення втрат експлуатаційної готовності для котлів з механічним збудженням тяги можливе на основі наступних міркувань.

Масова витрата повітря при нормальній роботі котла з механічним дуттям може бути визначена з рівняння гідравлічного опору газоповітряного тракту котла (11) з урахуванням додаткового механічного напору збудника:

$$G = A \cdot \sqrt{(\Delta p + \Delta p_{мз}) \cdot \rho_{yx}}, \quad (17)$$

де  $\Delta p$  – природно-гравітаційна складова тяги (кПа);

$\Delta p_{мз}$  – напір механічного збудження (кПа).

Тоді вплив механічного збудження тяги

можна врахувати коефіцієнтом механічного збудження:

$$k_{мз} = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p + \Delta p_{мз}}}. \quad (18)$$

При цьому:

$$G = A \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_{yx}} \cdot \frac{1}{k_{мз}}. \quad (19)$$

Отже, для оцінки втрат експлуатаційної готовності котлів з механічним або природно-гравітаційним збудженням тяги можна одержати з (8):

$$q_b \approx q_5 + q_1 \cdot k_{мз} \cdot \frac{T_{yx}}{T_b} \cdot \left( \frac{T_b - T_a}{T_{yx} - T_a} \right)^{3/2}. \quad (20)$$

Для визначення коефіцієнта механічного збудження необхідно знати розрахунковий напір механічного збудника (як правило, 100 Па) та мінімально припустиме розрядження у топці котла (звичайно 1,3–1,5 Па). При цьому для типових конструкцій вентиляторних котлів (у разі відсутності відповідних характеристик) можна прийняти орієнтовно  $k_{мз} \approx 0,11$ . Слід зазначити, що у проведених викладках не враховано можливі зміни коефіцієнтів гідравлічного опору газоповітряного тракту в умовах вимушеної та природно-гравітаційної течії, тому одержані результати слід вважати суто оціночними.

Щодо котлів комбінованого типу, які працюють цілорічно як для опалення, так і для гарячого водопостачання, у формулі (16) слід використовувати середньорічне значення температури повітря згідно з [8]. Для більшості території України це значення може бути однаковим, на рівні 9 °С (282 К).

Адекватність оцінок за формулою (16) можна перевірити на прикладі одного з популярних в Україні типів котлів, що випускаються у двох модифікаціях: з природно-гравітаційним збудженням тяги та механічним (примусовим). Середньорічні значення втрати експлуатаційної готовності, як і значення питомих втрат з газами, що виходять, та із зовнішнім охолодженням для обох модифікацій, наведено у переліку їхніх технічних характеристик.

Результати відповідного зіставлення фактичних та оціночних показників ефективності на прикладі комбінованого побутового котла одного з найрозповсюдженіших типів потужністю 24 кВт з природною тягою та примусовою

Таблиця 1

Показники	Розмірність	Позначення	Значення	
			Природна	Примусова
Тип тяги	—	—	Природна	Примусова
Температура нагріву	°С	$T_b$	83	83
Температура газів, що відходять	°С	$T_{yx}$	94	116
Температура повітря (середньорічна)	°С	$T_a$	9	9
Питома втрата з газами, що відходять	%	$q_1$	6,1	5,8
Питома втрата із зовнішнім охолодженням	%	$q_5$	3,2	1,2
Коефіцієнт корисної дії	%	$\eta_k$	90,7	93
Втрата експлуатаційної готовності (факт)	%	$q_b$	8,5	1,6
Коефіцієнт зниження втрат тепла з газами, що відходять	—	$\alpha_5$	0,837	0,069
Втрата експлуатаційної готовності (розрахунок за формулами (16), (20))	%	$q_b$	8,3	1,60

показують, що для даного котла оціночна втрата експлуатаційної готовності відрізняється від паспортного значення у межах означеної похибки (див. табл. 1).

Для того щоб визначити ступінь впливу втрат експлуатаційної готовності на річний КВП поквартирних побутових котлів, необхідно оцінити значення коефіцієнта використання встановленої потужності таких котлів. Для окремого домогосподарства (приватного будинку/квартири) в Україні цей показник обчислюється за формулою:

$$\varphi = n \cdot \frac{\bar{Q}_h \cdot \tau_{oc} \cdot f + \bar{Q}_w \cdot \tau_o}{Q_w^{\max} \cdot \tau_o}, \quad (21)$$

де  $n$  – кількість мешканців у домогосподарстві (осіб);

$\bar{Q}_h$  – середня питома теплова потужність опалення за опалювальний сезон (кВт/м<sup>2</sup>);

$\tau_o$  – річна кількість годин використання котла;

$\tau_{oc}$  – тривалість опалювального сезону (год);

$f$  – забезпеченість житловою площею однієї особи (м<sup>2</sup>/чол.);

$\bar{Q}_w$  – середньорічна теплова потужність гарячого водопостачання на одну особу (кВт/чол.);

$Q_w^{\max}$  – максимальна теплова потужність гарячого водопостачання (кВт).

У формулі (19) враховано, що необхідна потужність поквартирних котлів обирається звичайно за максимальною потужністю гарячого водопостачання.

Для типових домогосподарств України можуть бути прийняті показники, наведені у табл. 2.

Отже, відповідно до формули (19) значення

Таблиця 2

Показники	Значення
$n$	2 – 3
$f$	20 м <sup>2</sup> /чол.
$\bar{Q}_h$	0,04 кВт/м <sup>2</sup> (квартира багатоповерхового будинку)
$\bar{Q}_h$	0,09 кВт/м <sup>2</sup> (одноповерховий будинок)
$Q_w$	0,34 кВт/чол.,
$Q_w^{\max}$	24 кВт
$\tau_o$	8700 год
$\tau_{oc}$	4380 год

типового КВП поквартирного котла у багатоповерховому будинку становить  $\varphi = 0,093$ , а параметра  $\frac{1}{\varphi} - 1 = 9,75$ . Для одноповерхового

будинку ці показники дорівнюють 0,156 та 7,419 відповідно. При цьому згідно з формулою (6) річна ефективність використання палива (річний КВП) котла із значенням втрати експлуатаційної готовності 8,5 % оцінюється у 49,6 % проти 90,7 % ККД номінального режиму. Таким чином, питома витрата експлуатаційної готовності може дуже істотно впливати на середньорічну ефективність побутового котла. Тому не випадково проблема зниження втрат експлуатаційної готовності вже багато років розглядається у провідних країнах світу, де розроблено досить ефективні заходи з її вирішення [6, 7].

Одним із основних заходів щодо зниження втрат готовності (формула (6)) є зниження температури поверхні нагрівання котла. Цей захід широко реалізовується на практиці шляхом впровадження систем низькотемпературного (65–75 °С) та понаднизькотемпературного тепlopостачання, заснованих на використанні вентиляторних радіаторів та систем опалення типу “тепла стеля”. Ще одним дієвим заходом є зміна температури котла відповідно до змін температури зовнішнього повітря.

Ефективним виявилось обмеження циркуляції повітря через котел, який перебуває у стані експлуатаційної готовності, шляхом впровадження механічних збудників руху повітря і газів у котлі (дутьових вентиляторів, димососів тощо), встановлення дворежимних і модульних пальників, використання герметичних котлів з автоматичним частковим переключенням газового тракту тощо.

Вживання цих та інших заходів з підвищення середньорічної ефективності побутових котлів малої потужності дає можливість знизити питоми втрати експлуатаційної готовності поквартирних комбінованих котлів до 1,45 % [6, 7]. Згідно з розрахунком за формулою (6) це дає можливість підвищити річний КВП поквартирних комбінованих котлів для середньостатистичних багатоповерхових та одноповерхових будинків до 79–81 % відповідно.

Однак відповідний рівень КВП досягається ціною збільшення вартості побутових котлів,

ускладнення їх експлуатації та сервісного обслуговування. Крім того, використання механічних збудників руху газів та циркуляції води, електронних систем автоматики спричиняють зростання витрат на електричну енергію, унаслідок чого такі котли стають залежними від умов електропостачання. Хоча споживання електричної потужності сучасними електрифікованими котлами тепловою потужністю близько 24 кВт становить лише 80–150 Вт, ця величина є порівнянною із середньодушовим споживанням електричної потужності населенням, що дорівнює 70–100 Вт. Тому встановлення сучасного електрифікованого індивідуального котла призведе до зростання споживання електричної енергії середнім домогосподарством на 20–30 %. Для багатьох населених пунктів України, особливо малих міст і селищ, надійність електропостачання усе ще залишає бажати кращого, що є певним обмеженням щодо використання високотехнологічної котельної техніки.

## ВИСНОВКИ

Для об'єктивного порівняння систем централізованого та індивідуального тепlopостачання необхідно використовувати річні значення ефективності малих побутових котлів, визначення яких не регламентується чинними стандартами України на відміну від стандартів ЄС. Згідно з виконаними оцінками річні значення ККД комбінованих побутових котлів малої потужності, особливо котлів з релейним регулюванням температури нагрівання, можуть бути значно нижчими за номінальні значення, які вказуються в їхніх технічних характеристиках. Це дезорієнтує як потенційних користувачів, так і розробників систем тепlopостачання населених пунктів України. З огляду на це, необхідно забезпечити впровадження в Україні сучасних методів визначення ефективності побутових котлів на основі гармонізації відповідних міжнародних стандартів.

1. *Светлова В.* Глобальное утепление / Светлова В. // Эксперт. – 2008. – № 37 (180). <http://www.expert.ua/articles/16/0/6079/>.
2. *Оборудование* для автономного теплоснабжения / Электронный журнал энергосервисной компании “Экологические системы”. – 2002. – № 7. [http://esco-ecosys.narod.ru/2002\\_7/art43.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2002_7/art43.htm).

3. *Пацков Е. А.* Тепловая эффективность устройств децентрализованного теплоснабжения / Пацков Е. А., Свиридова Т. С. // Газовая промышленность. – 2003. – № 7. – С. 65–67.
4. *Жила В.* Анализ перспективных систем теплоснабжения / Жила В., Маркевич Ю. // С.О.К. – 2003. – № 7.
5. *Чумаченко И. Н.* КПД котлов и эффективность работы локальных отопительных систем (Опыт США) / Чумаченко И. Н. // Энергонадзор и энергосбережение сегодня. – 2001. – № 3. – С. 33–36.
6. *Вагнер Г.* Экономические показатели современных котельных установок / Гюнтер Вагнер // Отдельный оттиск по материалам НЛН 36. – 1985. – № 1. – № 7 (на русском языке). – Изд. VDI GmbH, Дюссельдорф. – 16 с.
7. *Вагнер Г.* Обеспечение горячей водой вне отопительного периода / Гюнтер Вагнер // Специальное издание материалов из "Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik – gi". – 1983. – № 104. – Тетрадь 4. – С. 161 – 169 (на русском языке).
8. *Rosa L.* / Lorenzo Rosa, Renzo Tosato // Energy and Buildings. – 1990. – Volume 14. – Issue 3. – November. – P. 237–241.

*Надійшла до редколегії: 16.09.2010*