

DOI 10.15589/jnn20160407

УДК 621.181.27

Д64

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEAT RECOVERY BOILERS ON THE EFFECT ON THE EFFICIENCY OF COMBINED CYCLE COGENERATION POWER PLANTS

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ ПО ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ГАЗОПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Yurii A. Dolganov

yuri.dolganov1987@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3353-1057

Oleksandr A. Yepifanov

epifanov.nuk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8744-4779

Ю. А. Долганов,

канд. техн. наук, асист.

О. А. Єпіфанов,

канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The analysis of the influence of the type of waste heat boiler for electric, thermal efficiency and weight and overall dimensions of cogeneration combined-cycle power plants is made. The results of calculation of the specific indicators of the efficiency of the installation, depending on the type of the recovery boiler are shown.

Keywords: waste heat boiler; two-phase gravity thermosyphons; cogeneration combined-cycle power plant.

Анотація. Проведена порівняльна оцінка впливу типу котлів-утилізаторів на електричну, теплову ефективність та масогабаритні показники когенераційних газопаротурбінних установок. Наведені результати розрахунків питомих показників ефективності установки в залежності від обраного типу котла-утилізатора.

Ключові слова: котел-утилізатор; двофазний термосифон; когенераційна газопаротурбінна установка.

Аннотация. Выполнен анализ влияния типа котла-утилизатора на электрическую, тепловую эффективность и массогабаритные показатели когенерационных газопаротурбинных установок. Приведены результаты расчетов удельных показателей эффективности установки в зависимости от выбранного типа котла-утилизатора.

Ключевые слова: котел-утилизатор; двухфазный термосифон; когенерационная газопаротурбинная установка.

REFERENCES

- [1] Dolganov Yu. A., Epifanov A. A. *Issledovanie vliyaniya temperatury naruzhnogo vozdukha na effektivnost raboty kogeneratsionnykh ustanovok parogazovogo tsikla* [The investigation of the outside air temperature influence on the efficiency of the combined cycle cogeneration power plants]. *Enyergobezopasnost i enyergosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2013, issue 4, pp. 18–21.

- [2] Dyban Ye. P. *Gazoturbinnnye i parogazovye ustanovki dlya stantsionnoy i munitsipalnoy elektroenergetiki. Energeticheskie gazoturbinnnye ustanovki* [Gas turbine and combined-cycle plants for electric and municipal power station. Gas turbines power plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 1994, issue 1, pp. 66–93.
- [3] Epifanov O. A., Dymo B. V., Dolganov Yu. A. *Osoblivosti konstruksii ta metodiki teplovogo rozrakhunku termosifonnogo sektsiynogo kotla utilizatora* [Development of construction and heat design procedure of thermosiphon sectional waste-heat boiler]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific papers of NUS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2011, issue 2, pp. 97–105.
- [4] Kuznetsov V. V., Kuznetsova S. A., Movchan S. M., Solomoniuk D. M. *Utylizatsiini kotly hazoturbinnnykh ustanovok* [Heat recovery boilers of gas turbine power plants]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2011. 310 p.
- [5] Manushin E. A. *Kombinirovannnye energeticheskie ustanovki s parovymi i gazovymi turbinami* [Combined power plants with steam and gas turbines]. *Itogi nauki i tekhniki VINITI. Ser. Turbostroenie* [The results of science and technology. Turbine construction]. Moscow, 1990, issue 4, pp. 186–189.
- [6] Olkhovskiy G. G. *Gazovye turbiny i parogazovye ustanovki za rubezhom* [Gas turbines and combined-cycle plants abroad]. *Teploenergetika* [Power Engineering]. Moscow, 1999, issue 1, pp. 71–81.
- [7] Piore I. L. *Effektivnye teploobmenniki s dvukhfaznymi termosifonami* [Efficient heat exchangers with two-phase thermosiphons]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1991.
- [8] Stepanov I. R. *Parogazovye ustanovki. Osnovy teorii, primenenie i perspektivy* [Combined-cycle power plant. Fundamentals of the theory, application and prospects]. Apatity, Kolski Science Centre Publ., 2000. 196 p.
- [9] Tsanev S. V., Burov V. D., Remezov A. N. *Gazoturbinnnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas turbine combined cycle plants of electric power plants]. Moscow, MPEI Publ., 2002. 584 p.
- [10] Dolganov Yu. A., Epifanov A. A. The experimental investigation of internal thermal resistance in two-phase gravity thermosiphons. *European Researcher*, 2013, vol. 43 (3-1), p. 539–542.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розвиток енергетики на базі газотурбінних та газопаротурбінних технологій забезпечує підвищення ефективності теплових електростанцій і зниження їх негативного впливу на навколишнє середовище. На фоні загальносвітової тенденції децентралізації енергетичних систем перспективними для впровадження у вітчизняну енергетику можуть стати когенераційні газопаротурбінні установки (ГПТУ) на базі ГТД потужністю від 2 до 10 МВт, що може підвищити загальний рівень ефективності вироблення електричної та теплової енергії.

Важливим елементом теплоутилізаційного контура (ТУК) когенераційних установок є котел-утилізатор (КУ). Використання змієвикових поверхонь нагріву і застосування примусової циркуляції в випарному контурі КУ вертикального компоновання з одного боку збільшує компактність ТУК, а з іншого — зменшує надійність роботи, внаслідок відмов змієвиків, що може стати причиною зниження енергетичної ефективності установки. КУ горизонтальної компоновки з природною циркуляцією у випарному контурі мають більшу металоемність конструкції, а також більший аеродинамічний опір при рівних умовах проектування та експлуатації, що призводить до зменшення потужності газотурбінного двигуна та установки в цілому. Використання термосифонних поверхонь нагріву з природною циркуляцією в горизонтальних КУ може підвищити ефективність утилізації теплоти та надійність роботи установки в цілому.

Отримання знань щодо впливу типу котла-утилізатора на масогабаритні показники та показники ефективності установки є актуальним питанням, що допоможе у вирішенні питання підвищення ефективності таких установок в цілому.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В енергетиці реалізовано ряд теплових схем когенераційних установок та ГПТУ, які мають свої особливості та відмінності в технологічному процесі [2, 5, 6]. Когенераційні установки простого циклу, є найбільш простими за складом обладнання теплової схеми, однак ефективність вироблення електроенергії у них невисока (дорівнює номінальній потужності ГТД), ККД і коефіцієнт використання теплоти палива для ряду турбін від 2 до 10 МВт у них лежать в межах 28–36% і 40–48% відповідно. Когенераційні ГПТУ з КУ двох тисків, обладнані газовими підігрівниками мережної води (ГПМВ), значно складніше за складом теплової схеми, але дозволяють збільшити ефективність утилізації теплоти на 4–5%. Такі теплові схеми рекомендовано використовувати для ГТД з температурами відхідних газів не менше 500 °С [8].

Для використання в когенераційних ГПТУ на базі ГТД малої потужності — від 2 до 10 МВт з температурами відхідних газів до 480 °С рекомендується вибирати теплові схеми ТУК з одноконтурним КУ, обладнаним ГПМВ, яка дозволяє забезпечити високі значення електричного ККД (36–45%) і коефіцієнту

використання теплоти палива (48–56%) без значного ускладнення теплової схеми [9].

МЕТА РОБОТИ — отримати нові знання щодо впливу типу котла-утилізатора на масогабаритні показники та показники теплової та електричної ефективності когенераційних газопаротурбінних установок.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для проведення порівняльної оцінки були прийняті наступні типи котлів-утилізаторів:

- вертикальний змійовиковий з примусовою циркуляцією (рис. 1,а);
- горизонтально-вертикальний з природною циркуляцією (рис. 1,б);
- термосифонний горизонтальний з природною циркуляцією (рис. 1,в).

Для порівняння взята удосконалена конструкція термосифонного котла-утилізатора наведена у [3]. На основі розробленої у [1] математичної моделі, та програмного комплексу, що її реалізує на ЕОМ, були ви-

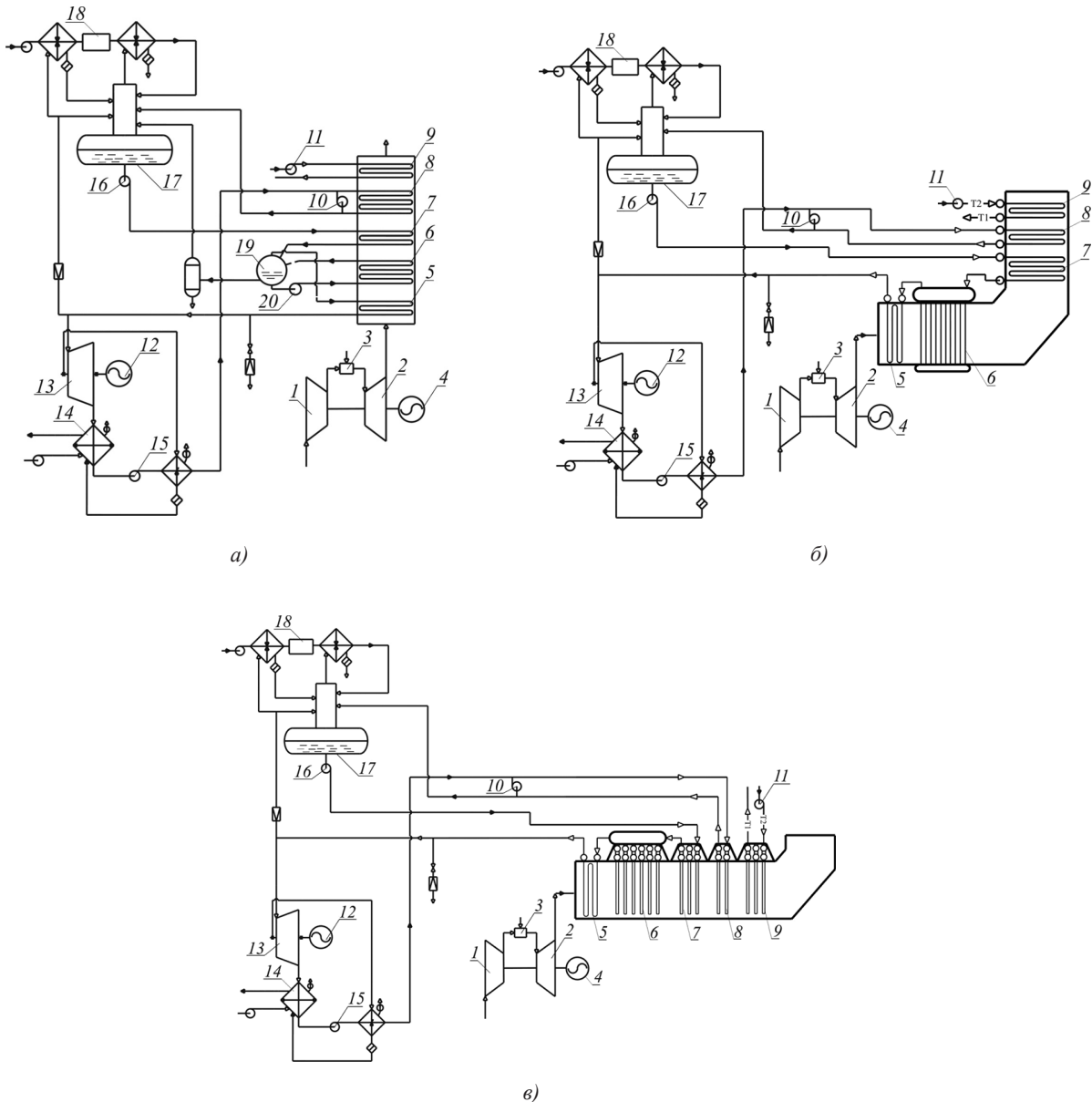


Рис. 1. Теплова схема когенераційної газопаротурбінної установки:

а) з вертикальним змійовиковим КУ з примусовою циркуляцією; б) з горизонтально-вертикальним КУ з природною циркуляцією; в) з термосифонним КУ з природною циркуляцією:

1 — компресор; 2 — турбіна; 3 — камера згоряння; 4, 12 — електрогенератори; 5 — пароперегрівник; 6 — випарник; 7 — економайзер; 8 — газовий підігрівник конденсату; 9 — підігрівник мережної води; 10 — циркуляційний насос; 11 — мережний насос; 13 — парова турбіна; 14 — конденсатор; 15 — конденсатний насос; 16 — живильний насос; 17 — деаератор; 18 — хімводоочистка; 19 — сепаратор; 20 — циркуляційний насос випарного контура

брані оптимальні початкові дані а також проведений тепловий розрахунок обраних котлів-утилізаторів. Для розрахунку секційного термосифонного КУ був використаний вдосконалений метод, викладений у [1, 3, 10].

Габаритні розміри та маси елементів котлів знаходяться за рекомендаціями [4].

Після цього була проведена порівняльна оцінка впливу типу котлів-утилізаторів на електричну та теплову ефективність установки і масогабаритні показники.

Вихідні параметри установки та котлів-утилізаторів, що порівнюються наведені у табл. 1.

Порівняння по масогабаритним показникам доцільно проводити за наступними критеріями [4]:

- питома паропроодуктивність котла-утилізатора;
- питома парозйом випарної поверхні котла-утилізатора;
- питома площа поверхонь нагріву котла-утилізатора;
- питома металоємність котла-утилізатора.

Питома паропроодуктивність котла-утилізатора — відношення повної паропроодуктивності до корисної потужності установки. Показник за яким можна порівняти ефективність процесу генерації пари конкретним типом котла-утилізатора когенераційної установки.

$$\eta_{D, \text{пит}}^{\text{КУ}} = \frac{D_{\text{КУ}}}{N_{\text{ел}}^{\text{уст}} + Q_{\text{кор}}^{\text{КУ}}}, \quad (1)$$

де $D_{\text{КУ}}$ — паропроодуктивність КУ, т/год, $N_{\text{ел}}^{\text{уст}}$, $Q_{\text{кор}}^{\text{КУ}}$ — корисна електрична та теплова потужність установки відповідно, кВт;

Так як паропроодуктивність котла-утилізатора у наших розрахунках є величиною сталою, а змінюється лише електрична потужність установки, то питома паропроодуктивність майже не змінюється.

Питома парозйом випарної поверхні котла-утилізатора — відношення повної паропроодуктивності до площі випарної поверхні. Показник за яким можна порівняти ефективність роботи випарних поверхонь нагріву котлів-утилізаторів.

$$d_{\text{пит}}^{\text{КУ}} = \frac{D_{\text{КУ}}}{F_{\text{вип}}}, \quad (2)$$

де $F_{\text{вип}}$ — площа випарної поверхні КУ, м².

Порівняння питомого парозйому випарної поверхні для різних типів котлів-утилізаторів наведено у вигляді діаграми на рис. 2.

Питома площа нагріву котлів утилізаторів це важливий показник, який характеризує наскільки вдало скомпоновані поверхні нагріву. Знаходиться відношенням повної поверхні нагріву КУ до суми корисно виробленої електричної та теплової потужності:

$$f_{\text{пит}}^{\text{КУ}} = \frac{F_{\text{КУ}}}{N_{\text{ел}}^{\text{уст}} + Q_{\text{кор}}^{\text{КУ}}}, \quad (3)$$

де $F_{\text{КУ}}$ — площа випарної поверхні КУ, м².

Порівняння питомої площі поверхонь нагріву для різних типів котлів-утилізаторів наведено у вигляді діаграми на рис. 3.

Питома металоємність — відношення повної маси КУ до суми корисно виробленої електричної та теплової потужності.

Таблиця 1. Вихідні параметри установки та котлів-утилізаторів

№	Параметр	Тип котла-утилізатора		
		Вертикальний змійовиковий з примусовою циркуляцією	Горизонтально-вертикальний з природною циркуляцією	Термосифонний з природною циркуляцією
1	Номинальна потужність двигуна (ГТД UGT 6000), кВт	6700		
2	Масова витрата продуктів згорання, кг/с	30,5		
3	Температура відхідних газів ГТД, °С	425		
4	Температура відхідних газів за КУ, °С	95		
5	Оптимальний тиск пари, МПа	1,5		
6	Температура перегрітої пари, °С	395		
7	Паропроодуктивність, т/год	10,1		
8	Тип пучка труб та їх будова	оробрені шахові		
9	Вид оробрення	спіральне стрічкове		
10	Зовнішній діаметр труб, м	0,022	0,022	0,032
11	Висота ребер, м	0,014		
12	Крок ребер, м,	0,005		
13	Товщина ребер, м	0,001		

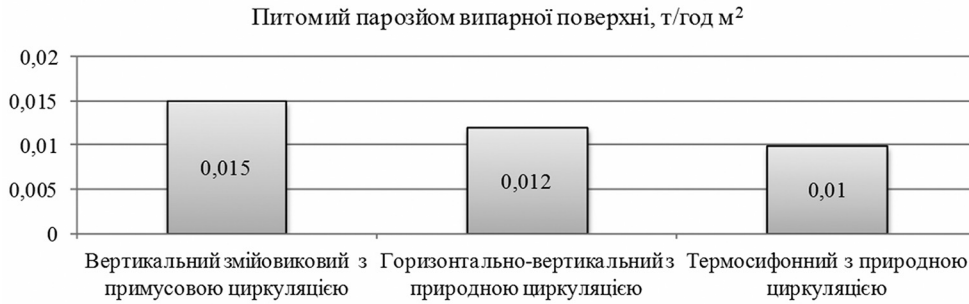


Рис. 2. Порівняння питомого парозйому випарної поверхні для різних типів котлів-утилізаторів



Рис. 3. Порівняння питомої площі поверхонь нагріву для різних типів котлів-утилізаторів

$$m_{\text{пит}}^{\text{КУ}} = \frac{M_{\text{КУ}}}{N_{\text{ел}}^{\text{уст}} + Q_{\text{кор}}^{\text{КУ}}} \quad (4)$$

Порівняння питомої металоємності для різних типів котлів-утилізаторів наведено у вигляді діаграми на рис. 4.

Окрім порівняння за масогабаритними показниками за результатами розрахунків проведена оцінка впливу на критерії теплової та електричної ефективності установки термосифонного котла з удосконаленою конструкцією.

Використання в складі установки удосконаленого термосифонного секційного котла-утилізатора дозволяє збільшити електричний ККД установки, коефіцієнт використання теплоти палива та зменшити

питому витрату палива установки в порівнянні з раніше розробленими термосифонними КУ за рахунок збільшення поверхні нагріву (рис. 5). Збільшення поверхні нагріву спричинило за собою збільшення аеродинамічного опору КУ і як наслідок зниження ефективності установки: електричний ККД зменшився на 0,9% а коефіцієнт використання теплоти палива на 1%. Однак приріст показників ефективності установки від збільшення теплової потужності секцій надав переважний вплив.

Використання в складі установки удосконаленого термосифонного секційного КУ дозволило отримати збільшення електричного ККД на 1,3% та коефіцієнту використання теплоти палива на 1,4%. Питома витрата палива на 1 кВт електричної потужності зменшилась на 4% з 0,252 до 0,241 м³/кВт·ч.



Рис. 4. Порівняння металоємності для різних типів котлів-утилізаторів

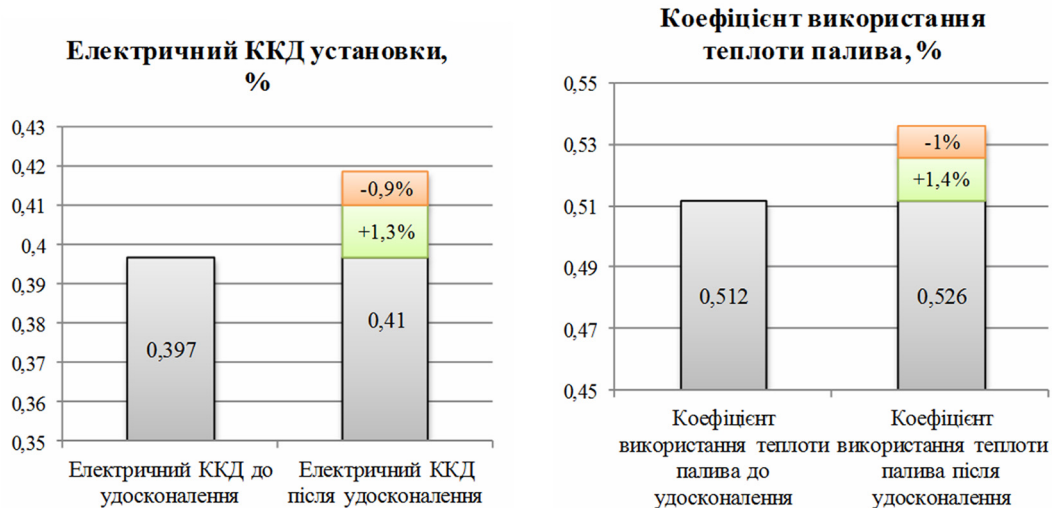


Рис. 5. Порівняння показників електричної та теплової ефективності установки з термосифонним КУ до та після вдосконалення конструкції

ВИСНОВКИ. 1. Результати порівняння КУ різних типів для когенераційної газопаротурбінної установки з ГТД UGT6000 показали, що застосування змійовикових КУ з примусовою циркуляцією вертикальної компоновки дозволяє отримати пара з 1 м² випарної поверхні на 20% більше порівняно з горизонтальною водотрубною і на 33% більше порівняно з термосифонною випарною поверхнею; питома площа нагріву горизонтального КУ більше на 12%, а термосифонного на 29% в порівнянні з вертикальним; питома

металоємність конструкції вертикального КУ менше на 5,7% ніж горизонтального і на 17,7% ніж термосифонного.

2. Використання в складі установки удосконаленого термосифонного секційного КУ дозволило отримати збільшення електричного ККД на 1,3% та коефіцієнту використання теплоти палива на 1,4% в порівнянні з відомими конструкціями термосифонних КУ. Питома витрата палива на 1 кВт електричної потужності зменшилась на 4% з 0,252 до 0,241 м³/кВт·ч.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Долганов, Ю. А. Исследование влияния температуры наружного воздуха на эффективность работы когенерационных установок парогазового цикла [Текст] / Ю. А. Долганов, А. А. Епифанов / Энергоресурсосбережение и энергоэффективность, 2013. — № 4 (52). — С. 18–21.
- [2] Дыбан, Е. П. Газотурбинные и парогазовые установки для стационарной и муниципальной электроэнергетики. Энергетические газотурбинные установки [Текст] / Промышленная теплотехника, 1994. — № 1. — С. 66–93
- [3] Єпіфанов, О. А. Особливості конструкції та методики теплового розрахунку термосифонного секційного котла утилізатора [Текст] / О. А. Єпіфанов, Б. В. Димо, Ю. А. Долганов // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. — № 2 (437). — С. 97–105.
- [4] Кузнецов, В. В. Утилізаційні котли газотурбінних установок: Навчальний посібник [Текст] / В. В. Кузнецов, С. А. Кузнецова, С. М. Мовчан, Д. М. Соломонюк. — Миколаїв : НУК, 2011. — 310 с.
- [5] Манушин, Э. А. Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами [Текст] // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Турбостроение. — 1990. — № 4. — 186 с.
- [6] Ольховский, Г. Г. Газовые турбины и парогазовые установки за рубежом [Текст] / Г. Г. Ольховский. — Теплоэнергетика. — 1999. — № 1. — С. 71–81
- [7] Пиоро, И. Л. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами [Текст] / И. Л. Пиоро. — Киев : Наукова думка, 1991.
- [8] Степанов, И. Р. Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы [Текст] / И. Р. Степанов. — Апатиты : изд. Кольского научного центра РАН, 2000. — 196 с.
- [9] Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов [Текст] / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов // под ред. С. В. Цанева. — М. : Издательство МЭИ, 2002. — 584 с.
- [10] Yuri A. Dolganov. The experimental investigation of internal thermal resistance in two-phase gravity thermosyphons [Текст] / Yuri A. Dolganov, Alexander A. Epifanov // European Researcher, 2013. — Vol. 43 (3-1). — P. 539–542.

© Ю. А. Долганов, О. А. Єпіфанов

Надійшла до редколегії 15.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. Б. Г. Тимошевський