

УДК 631.536

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; О. В. Куцак; И. Н. Дымнич
ГАЗОТУРБИННЫЕ НАДСТРОЙКИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ С ПРОТИВОДАВЛЕНЧЕСКИМИ
ПАРОВЫМИ ТУРБИНАМИ

Определены соотношения между основными показателями работы комбинированных установок на базе промышленных теплоэлектроцентралей с газотурбинными надстройками.

Ключевые слова: паровая турбина, газовая турбина, противоаварийная турбина, теплоэлектроцентраль.

Введение

Совместное производство тепловой и электрической энергии является прогрессивной технологией, которая позволяет более эффективно использовать органическое топливо и уменьшить вредные выбросы в атмосферу. Несмотря на значительный прогресс в развитии теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) в Украине, централизованное теплоснабжение большого количества потребителей осуществляется не от ТЭЦ, а от котельных. Эффективная работа ТЭЦ зависит от наличия постоянных тепловых нагрузок. Однако сейчас сложилась ситуация, когда вследствие уменьшения потребления технологического пара на промышленных ТЭЦ нельзя вырабатывать проектные электрические мощности. Необходимо учитывать также дефицит электроэнергии после полной остановки Чернобыльской атомной станции.

В состав большого количества предприятий перерабатывающего профиля входят промышленные ТЭЦ, оснащенные противоаварийными паровыми турбинами небольшой мощности (1,5 – 6 МВт). Такие паротурбинные установки (ПТУ) не имеют конденсаторов и характеризуются высокой энергетической эффективностью и тепловой производительностью. В ПТУ указанного типа доля выработки электроэнергии на тепловом потреблении (отношения электрической мощности к тепловой от 0,08 до 0,2) незначительна и изменяется. На сегодняшний день ПТУ противоаварийных на ТЭЦ работают недогруженными, или они остановлены. Тогда как, ПТУ с противоаварийными турбинами могут поставлять пар не только промышленным, но и теплофикационным потребителям. Что касается увеличения выработки электроэнергии на ТЭЦ, то эта проблема решается путем надстройки на существующих паротурбинных теплоэлектроцентралях газотурбинных установок (ГТУ) [1 – 3]. Газотурбинные надстройки на существующих промышленных ТЭЦ позволяют значительно повысить производство дополнительной электроэнергии и сэкономить топливо в энергосистеме. Эффективность применения ГТУ на конденсационных электростанциях, т. е. для более простых схем комбинированных установок, определена в [4].

Учитывая вышеизложенное, целью данной работы является определение показателей работы промышленных ТЭЦ с противоаварийными турбинами при надстройке их на газотурбинных установках.

Основные результаты

Принципиальная тепловая схема комбинированной установки на базе противоаварийной паровой турбины и ГТУ показана на рис. 1, где также приведены обозначения: расхода пара (D_0); давления (P); температур (t); энтальпий (h).

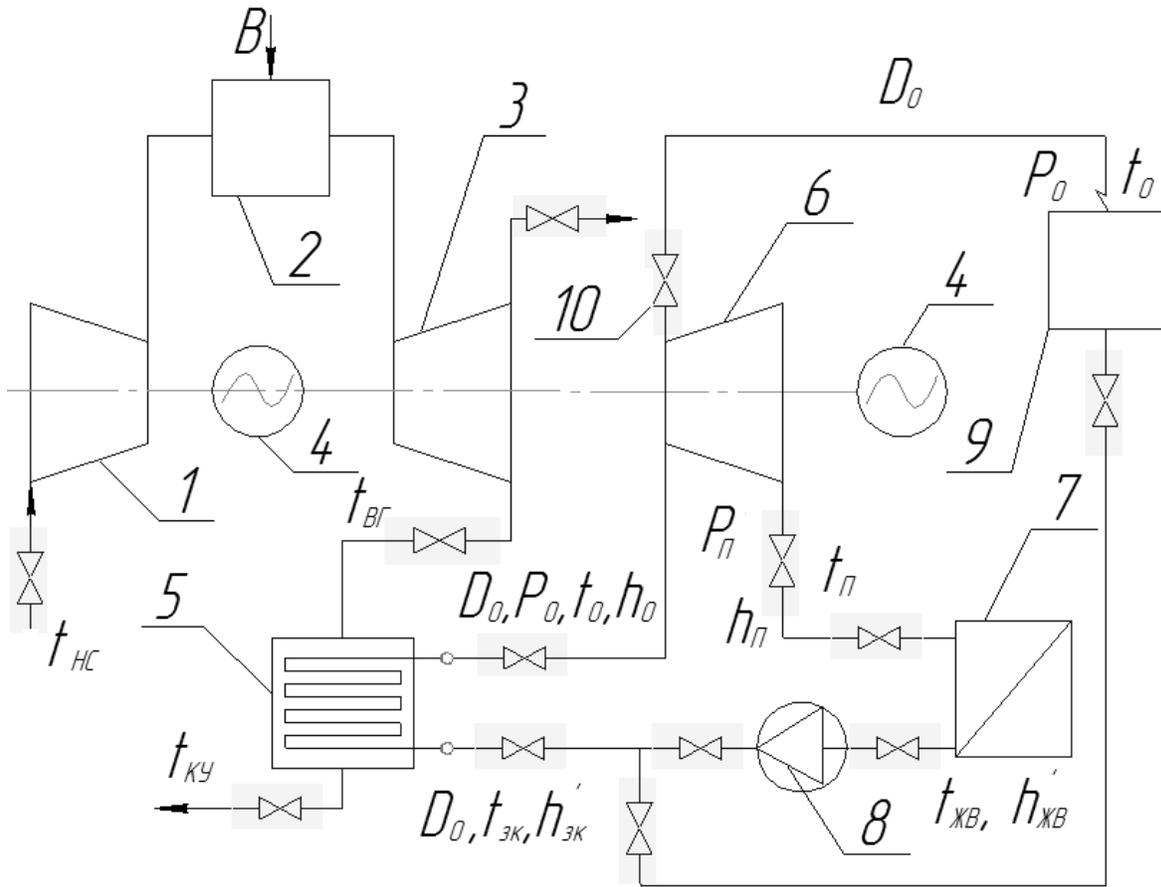


Рис. 1. Принципиальная схема газопаровой ТЭЦ: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания ГТУ; 3 – газовая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – котел-утилизатор; 6 – паровая противодавленческая турбина; 7 – потребитель пара; 8 – насос обратного конденсата; 9 – паровой котел; 10 – запорная арматура

Компрессор (1) сжимает воздух из окружающей среды и нагнетает его в камеру сгорания (2), где сгорает рабочее топливо (жидкое или газообразное) с расходом (B). Продукты сгорания поступают в газовую турбину (3), где выполняют работу вращения вала. Эта работа преобразуется в электрогенераторе (4) в электроэнергию. Отработанные в газовой турбине газы с температурой $t_{вг}$ направляются в котел-утилизатор (5), где, охлаждаясь до температуры $t_{ку}$, генерируют перегретый водяной пар с параметрами P_0, t_0 и расходом D_0 . Водяной пар выполняет работу в турбине (6) и с параметрами $P_{п}, t_{п}, h_{п}$ поступает к тепловым потребителям (7). Обратный конденсат с параметрами $t_{зк}, h'_{зк}$ насосом обратного конденсата (8) возвращается в котел-утилизатор (КУ). Такая комбинированная установка может работать как совместно, так и отдельно. В случае раздельной схемы вместо КУ работает паровой котел (9). Рассмотрим основные показатели работы установки.

Расход условного топлива на ГТУ [4]

$$B_{г} = N_{г} / (\eta_{г} \cdot Q_{у}), \quad (1)$$

где $N_{г}$ – электрическая мощность ГТУ; $\eta_{г}$ – ККД ГТУ; $Q_{у}$ – теплота сгорания условного топлива, равная 29,3 МДж/кг.

Тепловая мощность котла-утилизатора [4]

$$Q_{ку} = N_{г} \cdot \psi (1 - \eta_{г}) / \eta_{г} = N_{г} \cdot \varphi, \quad (2)$$

где $\psi = (t_{вг} - t_{ку}) / (t_{вг} - t_{нс})$ – коэффициент утилизации теплоты отработанных в ГТУ газов; $t_{нс}$ – температура окружающего воздуха, которая согласно международных правил равна 15°C.

Для упрощения расчетов значения коэффициента φ приведены на рис. 2.

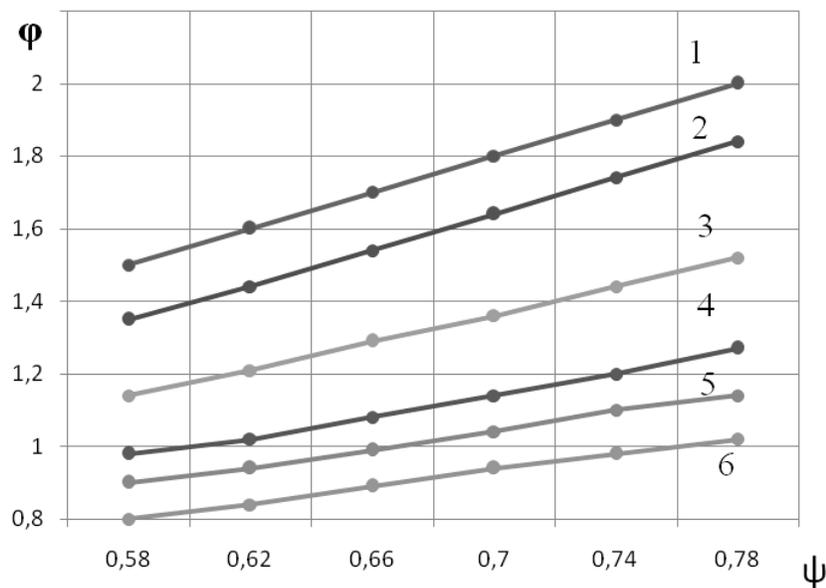


Рис. 2. Значение φ в формуле (2): 1 – $\eta_g = 0,28$; 2 – $0,3$; 3 – $0,34$; 4 – $0,38$; 5 – $0,42$; 6 – $0,46$

Понятно, что в случае совместной работы ГТУ и ПТУ мощность котла-утилизатора должна быть равна мощности ПТУ, т. е.

$$Q_{\text{кы}} = Q_{\text{сп}} + N_{\text{п}} = N_{\text{п}} (1 + e) / e = N_{\text{п}} \varepsilon, \quad (3)$$

где $N_{\text{п}}$ – электрическая мощность ПТУ; $Q_{\text{сп}}$ – тепловая мощность потребителей пара; $e = N_{\text{п}} / Q_{\text{сп}}$ – коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Сравнив (2) и (3), получим

$$N^* = N_{\text{г}} / N_{\text{п}} = \varepsilon / \varphi. \quad (4)$$

Последняя формула позволит определять электрическую мощность газотурбиной надстройки ПТУ с противодавленческой турбиной. Для оперативного определения величины N^* построенный график, изображён на рис. 3.

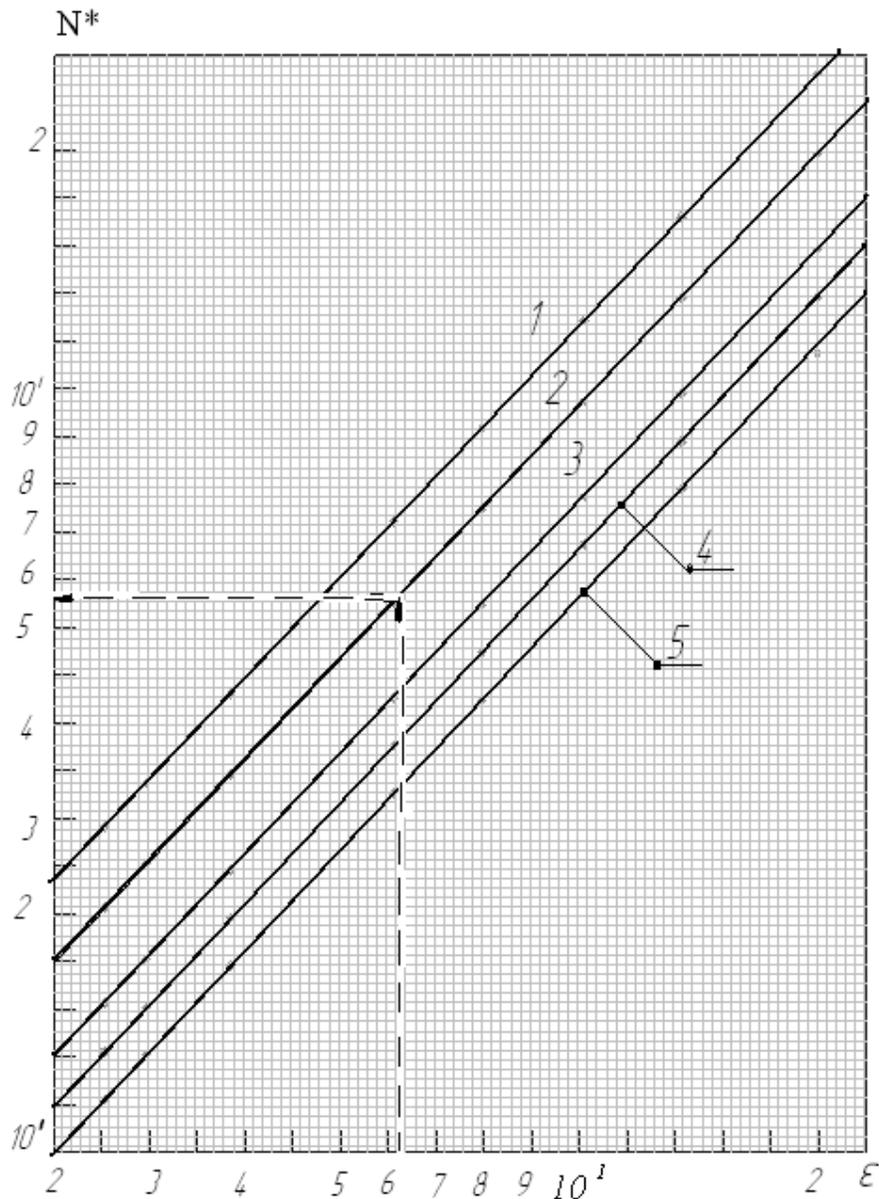


Рис. 3. Значения относительной электрической мощности по формуле (4): 1 – $\varphi = 0,9$; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 1,8; 5 – 2,1

В случае отдельной работы ПТУ расход условного топлива в паровом котле равен

$$B_n = (N_n + Q_{сн}) / (Q_y \cdot \eta_k) = N_n \epsilon / (Q_y \cdot \eta_k), \tag{5}$$

где η_k – КПД парового котла.

Учитывая (1) и (5), получим

$$B_r - B_n = N_n / Q_y (\epsilon / \varphi - 1 / \eta_k), \tag{6}$$

$$B^* = B_r / B_n = \eta_k / (\eta_r \cdot \varphi). \tag{7}$$

Формула (7) показывает, во сколько раз расход условного топлива в ГТУ должен быть больше расхода условного топлива в ПТУ. Для удобства на рис. 4 построена номограмма для определения относительного расхода топлива B^* .

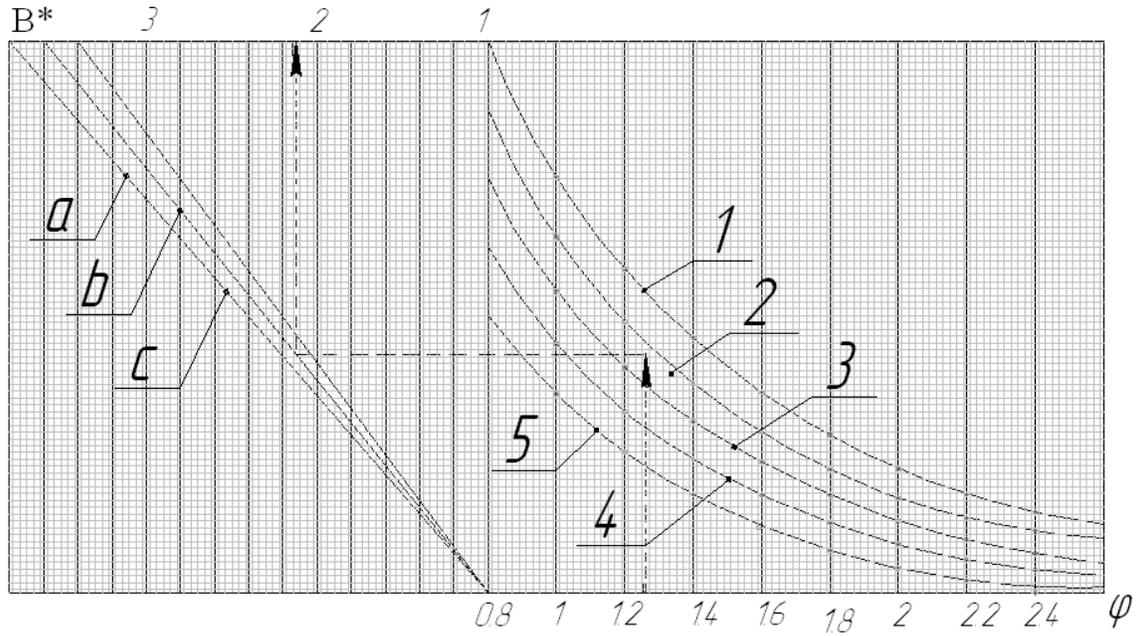


Рис. 4. Номограмма для определения V^* в формуле (7): 1 – $\eta_r = 0,3$; 2 – $0,34$; 3 – $0,38$; 4 – $0,4$; 5 – $0,44$; a – $\eta_k = 0,94$; b – $0,9$; c – $0,86$

Суммарная мощность, выработанная на ГТУ – ТЭЦ

$$Q_c = N_r + N_{п} + Q_{сп} = N_{п} \varepsilon (1 + \varphi) / \varphi = N_{п} \varepsilon \alpha. \quad (8)$$

Энергетическая эффективность ГТУ – ТЭЦ однозначно оценивается при помощи удельного расхода условного топлива [5], величина которого в нашем случае равна, кг/ГДж

$$b = B_r / Q_c = 10^3 / [\eta_r \cdot Q_y (1 + \varphi)]. \quad (9)$$

Для экспресс-оценки энергетической эффективности работы газотурбинной надстройки на промышленных ТЭЦ с противодавленческими турбинами можно пользоваться зависимостями, приведенными на рис. 5.

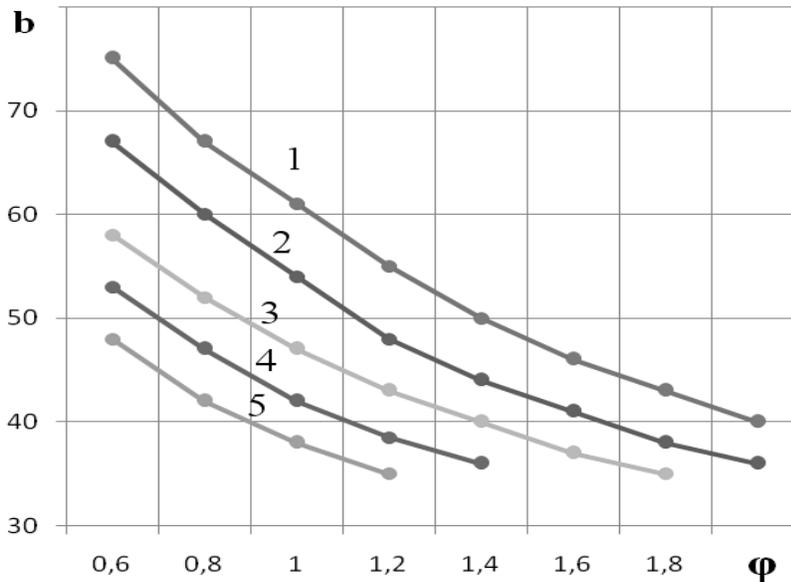


Рис. 5. Значения удельного расхода условного топлива на совместную выработку тепловой и электрической энергии: 1 – $\eta_r = 0,28$; 2 – $0,32$; 3 – $0,36$; 4 – $0,4$; 5 – $0,44$

Таким образом, получены удобные для инженерных расчетов формулы, а также построены графики и номограмма для определения характеристик и показателей работы
 Наукові праці ВНТУ, 2011, № 1

комбинированных энергетических установок в составе ГТУ и ПТУ с противоаварийными турбинами. Эти результаты являются необходимой предпосылкой для внедрения газотурбинных надстроек на промышленных ТЭЦ. Проиллюстрируем это на примере. Пуск необходимо подобрать ГТУ для надстройки ПТУ с противоаварийной турбиной Р-4-35/3, имеющей такие характеристики [6]: электрическая мощность 4 МВт; давление и температура пара перед турбиной 3,5 МПа, 435°C соответственно; расход пара на турбину 35,6 т/час; температура питательной воды 105°C; давление пара за турбиной 0,3 МПа; мощность потребителей пара 23,9 МВт.

Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении и величина ε в (3).

$$\varepsilon = N_{\text{п}} / Q_{\text{сп}} = 4/23,9 = 0,1673; \quad \varepsilon = (1 + 0,1673)/0,1673 = 6,975.$$

Подбираем ГТУ отечественного производства из номенклатуры предприятия НВП «Машпроект» г. Николаева. При этом берем ГТУ с наибольшим КПД ($\eta_{\text{г}} = 0,36$) и с температурой газов за турбиной $t_{\text{вг}} = 490^\circ\text{C}$. Для обеспечения необходимого температурного напора в КУ температуру за КУ принимаем 160°C .

Коэффициент утилизации теплоты в КУ

$$\Psi = (t_{\text{вг}} - t_{\text{ку}}) / (t_{\text{вг}} - t_{\text{нс}}) = (490 - 160) / (490 - 15) = 0,694.$$

Из рис. 2 определяем коэффициент ϕ в (2): $\phi = 1,23$.

Из рис. 3 определяем значение N^* , которое равно 5,8.

Необходимая мощность ГТУ, МВт

$$N_{\text{г}} = N^* \cdot N_{\text{п}} = 5,8 \cdot 4 = 23,2.$$

Окончательно выбираем тип ГТУ производства НАП «Машпроект», а именно – турбину ГТ-25 с $\eta_{\text{г}} = 0,36$ и $t_{\text{вг}} = 490^\circ\text{C}$.

Расход условного топлива на ПТУ по (5), кг/с

$$B_{\text{п}} = (4 + 23,9) / (29,3 \cdot 0,9) = 1,05.$$

Из рис. 4 определяем величину B^* в формуле (7): $B^* = 21,5$.

Необходимый расход условного топлива на надстроенную ГТУ, кг/с

$$B_{\text{г}} = B^* \cdot B_{\text{п}} = 1,05 \cdot 21,5 = 22,5.$$

Проверяем расход условного топлива на ГТУ по (1), кг/с

$$B_{\text{г}} = N_{\text{г}} / (\eta_{\text{г}} \cdot Q_{\text{в}}) = 23,2 / (0,36 \cdot 29,3) = 2,2.$$

Из рис. 5 определяем удельный расход условного топлива на комбинированную установку:

$$b = 42,5 \text{ кг/ГДж}.$$

Проверяем эту величину по формуле (9), кг/ГДж

$$b = 10^3 / [0,36 \cdot 29,3(1 + 1,23)] = 42,51.$$

Таким образом, использование приведенного графического материала обеспечивает необходимую точность расчетов. Отметим также, что величина удельного расхода условного топлива в комбинированной установке вдвое меньше, чем в ГТУ.

Выводы

1. Газотурбинные надстройки на промышленных ТЭЦ целесообразно использовать для увеличения выработки электроэнергии в регионе.
2. На промышленных ТЭЦ с противоаварийными турбинами за счет газотурбинных надстроек производство электроэнергии может быть увеличено в 5 – 6 раз.
3. Эффективность работы ГТУ – ТЭЦ с противоаварийными турбинами вдвое больше эффективности работы ГТУ.
4. Полученные формулы и графический материал позволяют с достаточной точностью определять основные показатели работы ТЭЦ с газотурбинными надстройками и являются необходимой предпосылкой для выбора ГТУ и оценки энергетической эффективности комбинированных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Л. И. О выборе схем теплоснабжения городов при использовании парогазовых технологий / Л. И. Левин // Промышленная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 57 – 58.
2. Ревзин Б. С. О роли теплофикации и о развитии ГТУ и ПТУ в новых условиях / Б. С. Ревзин, О. В. Комаров, А. А. Стяжкин // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 5. – С. 12 – 13.
3. Жарков С. В. О перспективах оборудования отопительных ТЭЦ в России / С. В. Жарков // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 2. – С. 12 – 13.
4. Чепурной М. Н. Эффективность применения ГТУ-ТЭС / М. Н. Чепурной, С. Й. Ткаченко, Е. С. Корженко // Энергосбережение. – 2006. – № 10. – С. 24 – 26.
5. Чепурний М. М. Ефективність роботи паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралей / М. М. Чепурний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 36 – 40.
6. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. – М.: Энергия. – 1978. – Т. 1. – 743 с.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., профессор кафедры теплоэнергетики, ИнСТЭГС.

Куцак Ольга Владимировна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Дымнич Илона Николаевна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.