

УДК 621.311.22

## Анализ показателей работы ПГУ-325 с камерой сжигания дополнительного топлива при переменных нагрузках газотурбинной установки

Е.С. Малков

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: admin@tes.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Известна технологическая схема отпуска тепловой энергии с горячей водой от парогазовой установки с применением газового подогревателя сетевой воды и камеры сжигания дополнительного топлива в газоходе котла-утилизатора, отличающаяся от используемых в энергетике схем условиями осуществления процесса горения топлива. Проведенные исследования показали целесообразность размещения камеры сжигания дополнительного топлива за газовым подогревателем конденсата, однако эти исследования проведены при условии номинальной мощности энергоблока. Для разработки рекомендаций по проектированию и практическому использованию предложенной схемы требуется провести анализ показателей эффективности работы оборудования энергоблока в регулировочном диапазоне электрических нагрузок газотурбинной установки с учетом изменения внешних факторов, а также определить оптимальные варианты распределения теплофикационной нагрузки между оборудованием энергоблока.

**Материалы и методы:** Многовариантные расчеты показателей эффективности работы парогазовой установки при изменении влияющих факторов реализованы в программном комплексе Boiler Designer (Optsim-K). Сравнительный анализ режимов работы энергоблока и вариантов распределения теплофикационной нагрузки между источниками тепловой энергии проведен на основе коэффициента использования теплоты топлива.

**Результаты:** Получена зависимость коэффициента использования теплоты топлива энергоблока ПГУ-325 в регулировочном диапазоне нагрузок газотурбинной установки от температуры наружного воздуха и подключенной теплофикационной нагрузки. Выявлено преимущество при выработке тепловой энергии режима работы «моно-блок» по сравнению с режимом «дубль-блок» при равной подключенной теплофикационной мощности.

**Выводы:** Полученные результаты могут быть использованы при разработке технико-экономических обоснований модернизации котлов-утилизаторов с использованием камеры сжигания дополнительного топлива и газового подогревателя сетевой воды для нужд теплофикации.

**Ключевые слова:** газовая турбина, котел-утилизатор, камера сжигания дополнительного топлива, газовый подогреватель сетевой воды.

## Analysis of operating efficiency of CCP-325 with an additional combustion chamber under variable gas turbine loads

E.S. Malkov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: admin@tes.ispu.ru

### Abstract

**Background:** It is known that the technological scheme of delivering thermal energy by hot water from a steam-gas plant by using a delivery water gas heater and an additional combustion chamber within the heat recovery boiler duct differs from the schemes used in power industry in its fuel combustion conditions. The research conducted has shown that it is reasonable to mount additional combustion chambers behind the condensate gas heater; however, this study was carried out under the power unit rated capacity. To work out recommendations on design and implementation of the suggested scheme, it was necessary to analyze the power unit operating efficiency within the adjusting electric load range of a gas-turbine unit, to determine the influence of external factors and the optimal distribution of heating load among the power unit facilities.

**Materials and methods:** The author has made multivariant calculations of a combined-cycle plant operating efficiency depending on various factors by using the Boiler Designer (Optsim-K) software and has done a comparative analysis of power unit operating modes and heating load distribution variants on the basis of fuel heat utilization coefficient.

**Results:** The author has determined the dependence of the fuel heat utilization coefficient on outdoor temperature and connected cogeneration capacity for the CCP-325 power unit operation within the adjusting load range. It has been found that the «mono-unit» operating mode has an advantage over the «double-unit» one under the same cogeneration capacity.

**Conclusions:** The obtained results can be used in feasibility studies of modernization of heat recovery boilers that use an additional combustion chamber and a delivery water gas heater for power and heat generation.

**Key words:** gas turbine, heat recovery boiler, additional combustion chamber, delivery water gas heater.

Наиболее перспективным направлением в развитии отечественной энергетики является применение парогазовых установок (ПГУ) и повышение эффективности оборудования за счет выявления неиспользованных возможностей его эксплуатации [1, 2].

В проведенных ранее исследованиях [3, 4] показаны возможность и эффективность использования уходящих газов котла-утилизатора (КУ) для нагрева сетевой воды. Предложено использовать камеру сжигания дополнительного топлива (КСДТ) и газовый подогреватель сетевой воды (ГПСВ), последовательно установленные за газовым подогревателем конденсата (ГПК) в газоходе КУ.

Энергетические ГТУ редко работают в номинальном режиме. В ПГУ утилизационного типа параметры работы ГТУ оказывают определяющее влияние на работу КУ. Изменение температуры и расхода выхлопных газов ГТУ обуславливает изменение количества теплоты, утилизируемой в КУ. В свою очередь, режимом работы КУ определяются все параметры работы паротурбинной установки. Изменение давлений в контурах КУ определяет изменение теплоперепадов в цилиндрах паровой турбины, а изменение расхода пара в этих контурах влияет на величину внутреннего относительного КПД цилиндров и величину вырабатываемой паровой турбиной мощности.

Целью расчетного исследования является определение показателей работы дубль-блока ПГУ-325 при использовании КСДТ для нужд теплофикации. Решение поставленной задачи осуществлялось с использованием специально разработанной модели [5] в программном комплексе Boiler Designer фирмы ООО «Optsim-K».

В соответствии с ранее проведенными исследованиями [6], выбраны оптимальная конструкция ГПСВ с количеством рядов труб по ходу газов, равным 20, и режим работы с поддержанием постоянной температуры сетевой воды на выходе ГПСВ, равной 150°C. Тепловая мощность ( $Q_{\text{тф}} = 34,2 \text{ МВт}$ ) поддерживается постоянной путем регулирования расхода топлива в КСДТ.

Зависимость величины суммарного прироста расхода топлива определяется двумя составляющими:

- расходом топлива в КСДТ на выработку тепловой энергии;
- расходом топлива в камеру сгорания (КС) ГТУ на компенсирующую выработку электрической энергии (ввиду увеличения аэродинамического сопротивления газового тракта КУ и, как следствие, уменьшения электрической мощности ГТУ).

Зависимости значений суммарного абсолютного и относительного расходов топлива от электрической мощности ГТУ  $N_{\text{ГТУ}}$  и температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$  представлены на

рис. 1. При значении тепловой мощности ГПСВ 34,2 МВт суммарное увеличение расхода топлива в режиме работы «моноблок» не превышает 0,6 кг/с. Стоит отметить, что расчетный расход топлива водогрейным котлом КВГМ-35-150 при выработке аналогичной тепловой мощности составляет 0,69 кг/с.

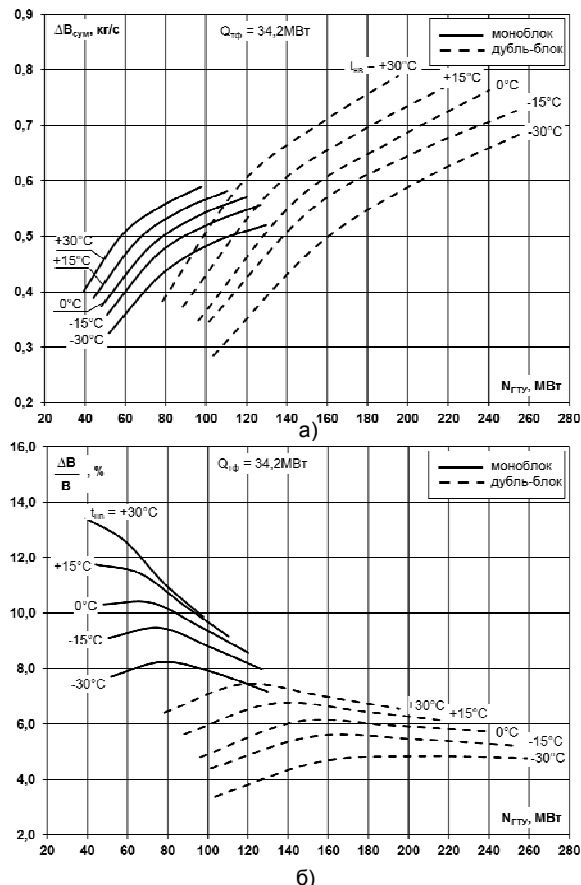


Рис. 1. Зависимости абсолютного (а) и относительного (б) прироста расхода топлива дубль-блока ПГУ-325 от электрической мощности ГТУ, температуры наружного воздуха и способа нагрузки КСДТ с ГПСВ в режиме работы «дубль-блок» при тепловой мощности  $Q_{\text{тф}} = 34,2 \text{ МВт}$

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показывает, что при постоянном значении  $Q_{\text{тф}}$  изменение относительной нагрузки ГТУ  $n_{\text{ГТУ}}$  от 0,4 до 1,0 приводит к увеличению расхода топлива для выработки тепловой мощности на 0,2 кг/с. Это обусловлено значительным изменением параметров потока газов на входе в КСДТ и влиянием парогенерирующих поверхностей КУ. Расход выхлопных газов ГТУ  $G_{\text{ГТУ}}^{\text{вых}}$  в указанном диапазоне нагрузок изменяется на 40÷50 кг/с, а их температура  $\vartheta_{\text{ГТУ}}^{\text{вых}}$  – на 120÷190°C [7]. Причем большие значения данных параметров соответствуют номинальной мощности ГТУ, но ввиду наличия парогенерирующих поверхностей температура газов на входе КСДТ  $\vartheta_{\text{КСДТ}}^{\text{вх}}$  (выходе ГПК) уменьшается при увеличении  $N_{\text{ГТУ}}$ .

Наименьшее абсолютное увеличение расхода топлива наблюдается при низких зна-

чениях  $t_{\text{нв}}$ . При увеличении  $t_{\text{нв}}$  от  $-30$  до  $+30^\circ\text{C}$  значение  $\vartheta_{\text{ГТУ}}^{\text{вх}}$  увеличивается от  $480$  до  $589^\circ\text{C}$ , но в то же время  $G_{\text{ГТУ}}^{\text{вх}}$  уменьшается на  $15\%$  (с  $406$  до  $346$  кг/с). Значение  $\vartheta_{\text{КСДТ}}^{\text{вх}}$  в зависимости от  $N_{\text{ГТУ}}$  уменьшается с  $125\div 142^\circ\text{C}$  до  $115\div 133^\circ\text{C}$  [7]. Поэтому для выработки тепловой энергии при низких значениях  $t_{\text{нв}}$  требуется меньшее количество топлива. График увеличения расхода топлива для теплофикации относительно расхода топлива в КС ГТУ имеет на нагрузках  $n_{\text{ГТУ}} \approx 0,6\div 0,7$  точку изгиба. Это связано с особенностями регулирования  $N_{\text{ГТУ}}$ : в диапазоне  $n_{\text{ГТУ}} = 0,7\div 1,0$  регулирование мощности осуществляется преимущественно входным направляющим аппаратом (ВНА) осевого компрессора (ОК), а при  $n_{\text{ГТУ}} < 0,7$  – расходом топлива при неизменном положении ВНА.

В диапазоне регулирования  $N_{\text{ГТУ}}$  с помощью ВНА расход газов за ГТУ  $G_{\text{ГТУ}}^{\text{вх}}$  при увеличении мощности значительно возрастает, значит, растет и потенциал для выработки тепловой мощности с использованием КСДТ и ГПСВ. И, несмотря на более низкие температуры на входе КСДТ (при  $n_{\text{ГТУ}} = 0,4\div 0,6$  в зависимости от  $t_{\text{нв}}$   $\vartheta_{\text{КСДТ}}^{\text{вх}} = 119,9\div 142,2^\circ\text{C}$ , а при  $n_{\text{ГТУ}} = 1,0$  –  $\vartheta_{\text{КСДТ}}^{\text{вх}} = 114,6\div 126,3^\circ\text{C}$ ), относительный прирост расхода топлива на энергоблок сокращается.

При номинальной мощности ГТУ достигается минимальное предельно-допустимое значение объемной концентрации кислорода  $\text{C}_{\text{O}_2}$  на выходе ГТУ в  $12\div 12,5\%$  (рис. 2). Увеличение расхода топлива в КСДТ наиболее заметно сказывается на концентрации  $\text{C}_{\text{O}_2}$  на выходе КСДТ при высоких нагрузках ГТУ. Это обусловлено меньшими значениями коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на входе в КСДТ. Например, увеличение нагрузки КСДТ  $n_{\text{КСДТ}}$  с  $0,5$  до  $1,0$  при  $N_{\text{ГТУ}} = 150$  МВт приводит к уменьшению  $\text{C}_{\text{O}_2}$  на  $0,5\%$ , а при  $N_{\text{ГТУ}} = 230$  МВт – на  $1,15\%$ .

Для сравнительного анализа режимов работы оборудования энергоблока целесообразно применять показатели, не зависящие от метода отнесения суммарных затрат топлива к отпуску электрической и тепловой энергии. Для ПГУ-КЭС с КСДТ и ГПСВ таким показателем является коэффициент использования теплоты сжигаемого топлива (КИТ):

$$\eta_{\text{и.т}} = \frac{N_{\text{э}} + Q_{\text{ГПСВ}}}{Q_{\text{топл}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{э}}$  – электрическая мощность энергоблока;  $Q_{\text{ГПСВ}}$  – тепловая мощность ГПСВ;  $Q_{\text{топл}}$  – теплота сжигаемого топлива.

Предлагаемая модель КУ позволяет увеличить КИТ дубль-блока ПГУ-325 в режиме работы «моноблок» от  $3,8$  до  $13,7\%$ , в режиме работы «дубль-блок» от  $0,3$  до  $7,5\%$  (рис. 3).

Причем большие значения приростов КИТ соответствуют низким нагрузкам ГТУ. Это обусловлено тем, что наличие высоких значений  $\alpha$  на выходе КУ при низких нагрузках ГТУ приводит к увеличению потерь теплоты с уходящими газами  $q_2$  и снижению эффективности энергоблока, а использование потенциала выхлопных газов ГТУ за счет включения в работу КСДТ и ГПСВ уменьшает  $q_2$ , что наиболее заметно сказывается на показателях эффективности при данных нагрузках.

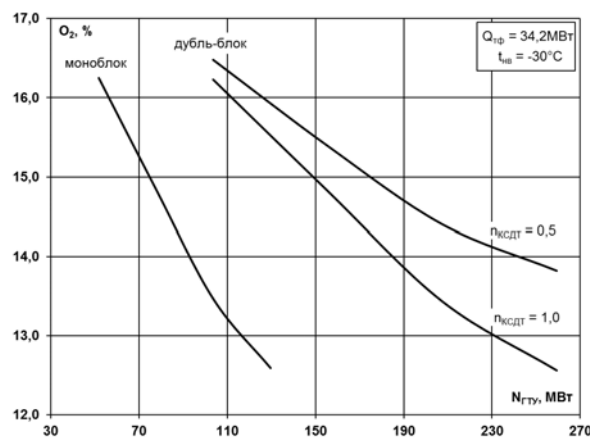


Рис. 2. Зависимость объемной концентрации кислорода на выходе КСДТ от электрической мощности ГТУ и способа нагрузки КСДТ с ГПСВ в режиме работы «дубль-блок» при тепловой мощности  $Q_{\text{тф}} = 30$  МВт и температуре наружного воздуха  $t_{\text{нв}} = -30^\circ\text{C}$

Увеличение  $t_{\text{нв}}$  приводит к увеличению КИТ. Это обусловлено рядом факторов:

- увеличением удельного объема воздуха (уменьшается его массовый расход) и, как следствие, снижением мощности и КПД ГТУ ввиду увеличения энергозатрат на привод ОК;
- уменьшением расхода топлива в КС и, как следствие, уменьшением объема газов за ГТУ [7].

Указанные факторы приводят к уменьшению потенциала для выработки тепловой мощности с использованием КСДТ и ГПСВ, т.е. при увеличении  $t_{\text{нв}}$  требуется большее количество топлива в КСДТ при одном значении тепловой мощности (рис. 1).

При изменении  $t_{\text{нв}}$  от  $-30$  до  $+30^\circ\text{C}$  электрическая мощность энергоблока  $N_{\text{эл}}$  уменьшается на  $11$  МВт, расход топлива в КС ГТУ  $B_{\text{КС}}$  – на  $1,23$  кг/с, расход топлива в КСДТ  $B_{\text{КСДТ}}$  увеличивается на  $0,09$  кг/с. При располагаемой теплоте сгорания топлива  $Q_p^c$ , равной  $50,06$  МДж/кг, знаменатель выражения (1) уменьшается примерно в  $6$  раз больше числителя, что и приводит к увеличению КИТ.

Изгиб графика зависимости КИТ также соответствует особенностям регулирования нагрузки ГТУ.

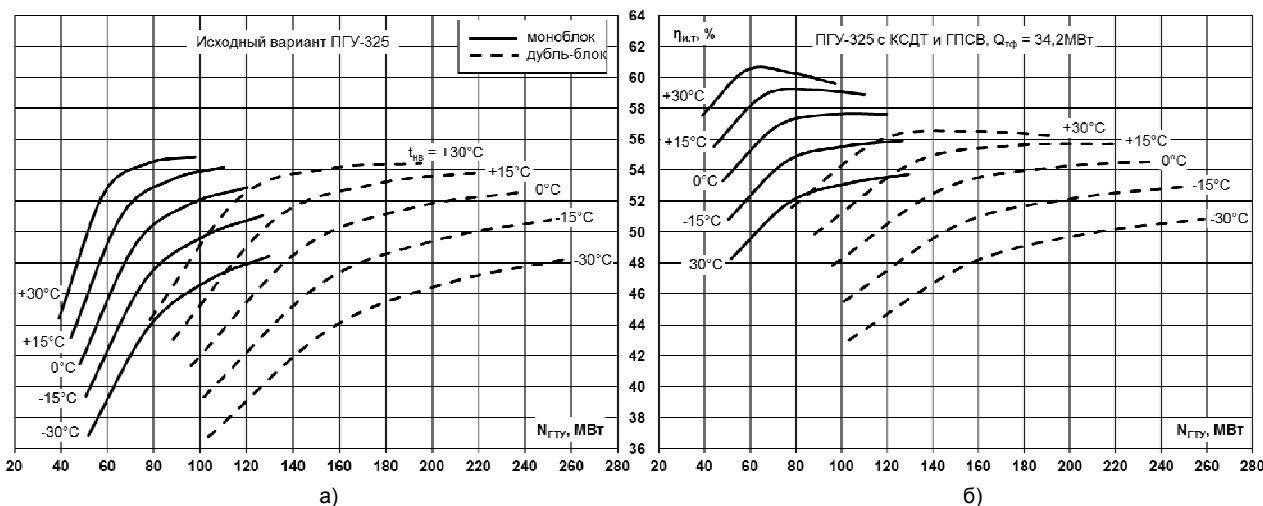


Рис. 3. Зависимость КИТ дубль-блока ПГУ-325 от электрической мощности ГТУ, режима работы (дубль-блок, моноблок) и температуры наружного воздуха для двух вариантов КУ: а – исходного; б – с применением КСДТ и распределением нагрузки дубль-блока между ГПСВ по 50 %

### Заключение

Проведенный анализ показателей работы ПГУ-325 с КСДТ и ГПСВ позволяет сделать вывод, что применение КСДТ на нужды теплофикации значительно увеличивает коэффициент использования теплоты топлива энергоблока. Наибольшие значения прироста данного показателя соответствуют низким нагрузкам ГТУ. При температурах наружного воздуха выше +15°C на нагрузках  $n_{ГТУ}$  больше 0,6 наблюдается снижение эффективности работы оборудования энергоблока.

### Список литературы

1. **Состояние** и перспективы развития энергетики Центра России / под ред. А.В. Мошкарин; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000.
2. **Анализ** направлений развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин, В.С. Рабенко; под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 256 с.
3. **Шельгин Б.Л., Мошкарин А.В., Малков Е.С.** Тепловая эффективность использования уходящих газов котла-утилизатора при сжигании дополнительного топлива // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 8–12.
4. **Малков Е.С., Шельгин Б.Л., Костерин А.Ю.** Технико-экономическое обоснование установки газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 9–14.
5. **Малков Е.С., Шельгин Б.Л.** Разработка расчетных моделей котла-утилизатора для анализа эффективности сжигания дополнительного топлива // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 15–18.
6. **Малков Е.С., Шельгин Б.Л.** Оптимизация компоновки газового подогревателя сетевой воды в газоходе котла-утилизатора // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 5–8.
7. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Жамлиханов Т.А.** Режимные характеристики ГТЭ-110 для энергоблока ПГУ-325 // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 7–11.

Малков Евгений Сергеевич,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант, инженер кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон (4932) 26-99-31,  
e-mail: admin@tes.ispu.ru

**8. Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Жамлиханов Т.А.**  
Влияние направляющего аппарата компрессора ГТЭ-110 на показатели работы блока ПГУ-325 // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 3.

### References

1. Moshkarin, A.V. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya energetiki Tsentra Rossii* [Status and prospects of Central Russia power system]. Ivanovo, 2000.
2. Moshkarin, A.V., Devochkin, M.A., Shelygin, B.L., Rabenko, V.S. *Analiz napravleniy razvitiya otechestvennoy teploenergetiki* [Analysis of development directions of the Russian power system]. Ivanovo, 2002. 256 p.
3. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V., Malkov, E.S. *Teplotovaya effektivnost' ispol'zovaniya ukhodyashchikh gazov kotla-utilizatora pri szhiganiy dopolnitel'nogo topliva* [Thermal efficiency of using exhaust gases of heat recovery boiler during the process of additional fuel combustion]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 8–12.
4. Malkov, E.S., Shelygin, B.L., Kosterin, A.Yu. *Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye ustanovki gazovogo podogrevatelya setevoy vody v gazokhode kotla-utilizatora* [Feasibility study of setting a network water gas heater in the gas duct of a recovery boiler]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 9–14.
5. Malkov, E.S., Shelygin, B.L. *Razrabotka raschetnykh modeley kotla-utilizatora dlya analiza effektivnosti szhiganiya dopolnitel'nogo topliva* [Developing of computational models of recovery boilers for analysis of additional fuel combustion efficiency]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 15–18.
6. Malkov, E.S., Shelygin, B.L. *Optimizatsiya komponovki gazovogo podogrevatelya setevoy vody v gazokhode kotla-utilizatora* [Structural optimization of a network water gas heater in a recovery boiler gas duct]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 5–8.
7. Moshkarin, A.V., Shelygin, B.L., Zhamlikhanov, T.A. *Rezhimnye kharakteristiki GTE-110 dlya energobloka PGU-325* [Gas Turbine Powerplant-110 operating characteristics for CCP-325 power unit]. *Vestnik IGEU*, 2010, issue 2, pp. 7–10.
8. Moshkarin, A.V., Shelygin, B.L., Zhamlikhanov, T.A. *Vliyaniye napravlyayushchego apparata kompressora GTE-110 na pokazateli raboty bloka PGU-325* [Influence of a Gas Turbine Powerplant-110 compressor stator on the operating characteristics of CCP-325 power unit]. *Vestnik IGEU*, 2010, issue 3.