

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-67-76

УДК 621.311

Когенерационные возможности повышения эффективности микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением

П. А. Щинников¹, Д. С. Синельников¹

¹Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Рассмотрены возможности работы генераторов электрического тока на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением в условиях когенерации, когда с отпуском электроэнергии обеспечивается отпуск теплоты в различных вариантах. Такие установки, как правило, выполняются на основе карбюраторных двигателей внутреннего сгорания (т. е. в качестве топлива используется бензин). Могут применяться в быту профессиональными строителями, геологами, военными и спасателями в зоне чрезвычайных ситуаций, на территориях с отсутствием инфраструктуры. В основе установки использован бензогенератор «Хитачи-2400» с воздушным охлаждением мощностью 2,4 кВт. Представлены основные методические положения для исследования микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением, в основе которых лежат балансовые уравнения. При работе установки обеспечивается измерение всех температур и расходов рабочих сред для определения тепловых потоков в соответствии с предложенной методикой. Представлены технические характеристики теплообменных аппаратов для утилизации теплоты отработавших дымовых газов. Построены энергетические диаграммы, иллюстрирующие полезный эффект от применения различных теплообменных аппаратов. Когенерационные возможности установки обеспечиваются, во-первых, отпуском теплоты с охлаждающим цилиндром двигателя внутреннего сгорания воздухом, во-вторых, отпуском теплоты с горячей водой, нагретой за счет утилизации теплоты уходящих дымовых газов, и в-третьих, в расчетном варианте – отпуском теплоты с воздухом, последовательно нагретым за счет охлаждения головки цилиндра, а затем – за счет утилизации теплоты уходящих газов. Показано, что коэффициент использования теплоты топлива может быть увеличен с 0,22 до 0,50–0,60 в зависимости от принятого технического решения.

Ключевые слова: микроТЭС, когенерация, двигатель внутреннего сгорания, воздушное охлаждение, тепловая пушка, коэффициент полезного действия

Для цитирования: Щинников, П. А. Когенерационные возможности повышения эффективности микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением / П. А. Щинников, Д. С. Синельников // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 1. С. 67–76. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-67-76

Адрес для переписки

Щинников Павел Александрович
Новосибирский государственный
технический университет
просп. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Российская Федерация
Тел.: +7 383 346-11-42
dekanat@power.nstu.ru

Address for correspondence

Shchinnikov Pavel A.
Novosibirsk State
Technical University
20 K. Marks Ave.,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 383 346-11-42
dekanat@power.nstu.ru

Cogeneration Opportunities to Improve the Efficiency of Micro Heat Power Plants Based on Air Cooled Internal Combustion Engines

P. A. Shchinnikov¹⁾, D. S. Sinelnikov¹⁾

¹⁾Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russian Federation)

Abstract. The possibilities of operation of electric generators based on internal combustion engines with air cooling under conditions of cogeneration, when, along with the electricity, heat release in different embodiments is provided. Such facilities are usually realized on the basis of gasoline internal combustion engines (i.e. gasoline is used as a fuel). They can be used in the household, by professional builders, geologists, the military and rescuers in the area of emergencies and in areas with a lack of infrastructure. The basis of the facility is the gasoline generator Hitachi-2400 with an air-cooled power of 2.4 kW. The basic methodology for the study of micro-thermal power plants based on an air-cooled internal combustion engine which is based on balance equations is presented. The facility operation ensures the measurement of all temperatures and expenses of operating environments for determining heat flow in accordance with the proposed methodology. The specifications of heat exchangers for utilizing the heat of exhaust flue gases are presented. The energy diagram illustrating the useful effect of the application of various heat exchangers are plotted. Cogeneration possibilities of the facility are provided, firstly, by the release of heat with the air that cools a cylinder of the internal combustion engine, and, secondly, by the release of heat of hot water heated by utilizing the heat of the leaving flue gases, and, thirdly, in the calculated version, by the release of heat with air that is sequentially heated due to the cooling of the cylinder head and then by utilizing the heat of exhaust gases. It is demonstrated that the fuel heat utilization factor can be increased from 0.22 to 0.50–0.60, depending on the adopted technical solutions.

Keywords: micro heat power plant (micro-hpp), cogeneration, internal combustion engine, air-cooled, heat gun, efficiency

For citation: Shchinnikov P. A., Sinelnikov D. S. (2017) Cogeneration Opportunities to Improve the Efficiency of Micro Heat Power Plants Based on Air Cooled Internal Combustion Engines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 67–76. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-67-76 (in Russian)

Повышение эффективности топливоиспользующих энергетических установок на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – актуальная задача. Вариантами повышения эффективности энергетических установок на базе ДВС являются: обеспечение когенерации [1–5], когда от теплоэнергетической установки потребителю отпускаются электроэнергия и теплота от контура охлаждения ДВС; тригенерация [6], когда в дополнение к указанным отпускам установка генерирует холод. В основе этих установок лежит работа ДВС с водяным контуром охлаждения. Вместе с тем на рынке широко представлен ряд микроТЭС (или бензогенераторов) на основе ДВС карбюраторного типа с воздушным охлаждением. Такие установки применяются в любое время года в быту, профессиональными строителями, геологами, военными и спасателями в зоне чрезвычайных ситуаций, на территориях с отсутствием инфраструктуры. В [7, 8] отмечено, что применение когенерации для таких микроТЭС увеличивает коэффициент использования теплоты топлива.

В данной статье приводятся результаты экспериментального исследования когенерационных возможностей бензогенератора на базе ДВС карбюраторного типа с воздушным охлаждением «Хитачи-2400» мощностью 2,4 кВт. Когенерационные возможности установки обеспечиваются, во-первых, отпуском теплоты с охлаждающим цилиндр ДВС воздухом, во-вторых, отпуском теплоты с горячей водой, нагретой за счет утилизации теплоты уходящих дымовых газов, и, в-третьих, в расчетном варианте – отпуском теплоты с воздухом, последовательно нагретым за счет охлаждения головки цилиндра, а затем – за счет утилизации теплоты уходящих газов (рис. 1).

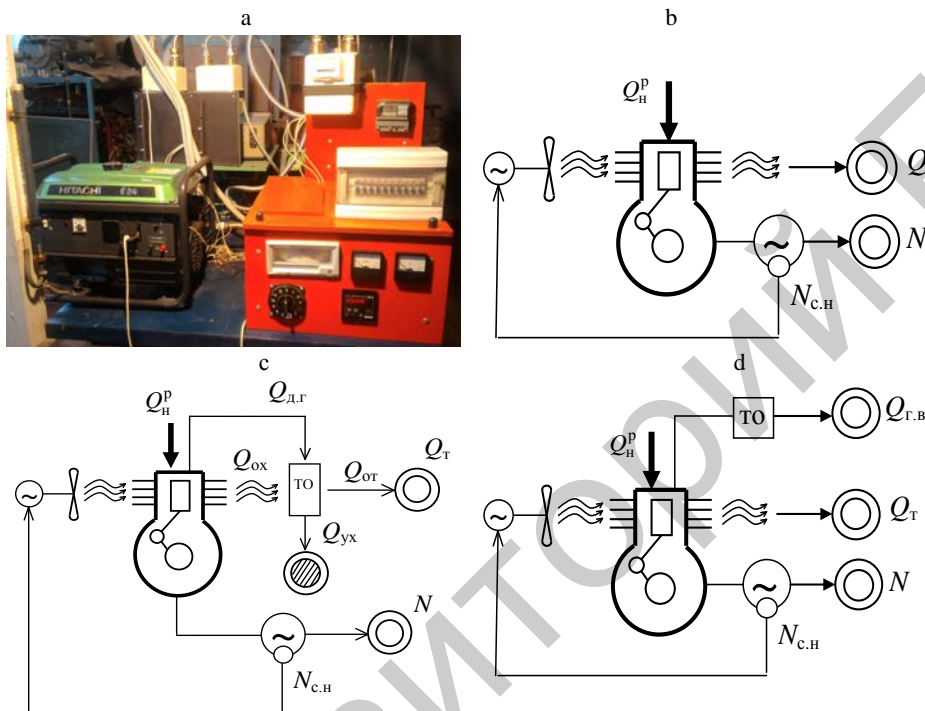


Рис. 1. Общий вид и схемы когенерационной установки на базе двигателя внутреннего сгорания с воздушным охлаждением: а – общий вид экспериментального стенда; б – схема без утилизации теплоты отработавших дымовых газов; в, д – схема с утилизацией теплоты отработавших дымовых газов в газоздушном и газоводяном теплообменниках;

ТО – теплообменник; Q_H^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива;

$Q_{г.в}$, Q_T , N , $N_{c,h}$ – нагрузка горячего водоснабжения, теплофикационная, электрическая и собственных нужд соответственно; Q_{ox} , $Q_{от}$, $Q_{д.г}$, Q_{yx} – тепловые потоки с воздухом, охлаждающим головку цилиндра двигателя, воздухом, отпускаемым потребителю теплоты, дымовыми газами, отработавшими в камере сгорания двигателя, и уходящими дымовыми газами

Fig. 1. General view and different schemes of air-cooled cogeneration plants based on internal combustion engine: а – general view of the experimental stand; б – the one without utilization of the heat of exhaust flue gases; в, д – the one with utilization of the heat of the exhaust flue gases in the gas-air and gas-water heat exchanger; ТО – heat exchanger; Q_H^p – lower operating heat of fuel combustion; $Q_{г.в}$, Q_T , N , $N_{c,h}$ – hot water supply, cogeneration, electricity and own needs load, respectively; Q_{ox} , $Q_{от}$, $Q_{д.г}$, Q_{yx} – heat flows from the air, cooling the cylinder head of the engine with the air released to the consumer of heat, flue gas exhaust in the combustion chamber of the engine, the leaving flue gas

Распределение теплоты, полученной при сгорании вводимого в цилиндр топлива, называют тепловым балансом, который определяется экспериментальным путем. Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q = Q_e + Q_{г.в} + Q_г + Q_{пот} + Q_{от} + Q_{ост}, \quad (1)$$

где Q – теплота топлива, введенная в двигатель; Q_e – то же, превращенная в полезную работу; $Q_{от}$ – то же с охлаждающим агентом (водой или воздухом), направленная на нужды отопления; $Q_{г.в}$ – то же с горячей водой на нужды горячего водоснабжения (ГВС) (при наличии контура утилизации теплоты отработавших газов); $Q_г$ – то же, потерянная с отработавшими газами; $Q_{пот}$ – то же, потерянная в окружающую среду через стенки системы эвакуации дымовых газов; $Q_{ост}$ – остаточный член баланса, который равен сумме всех неучтенных потерь.

Количество располагаемой (введенной) теплоты

$$Q = \frac{B_i Q_i^p}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – время, с; B_i – определяется по формуле

$$B_i = B_{изм} \rho \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

i – режим в зависимости от нагрузки; ρ – плотность топлива, кг/м³ ($\rho = 725-780$ кг/м³ – плотность жидкого топлива).

Теплота, превращенная в полезную работу:

$$Q_e = N_e. \quad (4)$$

Теплота, теряемая с отработавшими газами:

$$Q_г = \frac{V_г c_{pг} t_г}{\tau}, \quad (5)$$

где $V_г$ – расход газов, м³/кг; $c_{pг}$ – средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении, кДж/(м³·К); $t_г$ – температура отработавших газов, °С.

Теплоту, отведенную от ДВС обдувающим воздухом (отопительная нагрузка), и потери теплоты находим по следующим формулам:

$$Q_{от} = Q_{от1} + Q_{от2} = \alpha F_{ц} \Delta t + V_в c_{pв} t_в; \quad (6)$$

$$Q_{пот} = \alpha F_{то} \Delta t, \quad (7)$$

где $F_{ц}$, $F_{то}$ – площадь поверхности головки цилиндра ДВС и поверхности теплообменника соответственно; α – коэффициент теплоотдачи; Δt – соответствующий температурный напор; $V_в$, $c_{pв}$, $t_в$ – расход, изобарная теплоемкость и температура нагретого (отопительного) воздуха; $Q_{от1}$ – теплота от

охлаждения головки цилиндра двигателя; $Q_{от2}$ – теплота от охлаждения дымовых газов в специальном теплообменнике.

В (6) теплота, направленная с воздухом на отопление, учитывает $Q_{от1}$ и $Q_{от2}$. Теплота, отведенная на нужды горячего водоснабжения:

$$Q_{г.в} = Gc_p \Delta t, \quad (8)$$

где G – расход воды через теплообменник; c_p – изобарная теплоемкость воды; Δt – температурный напор на теплообменнике.

Остаточный член теплового баланса определим по формуле

$$Q_{ост} = Q - (Q_e + Q_{г.в} + Q_{г} + Q_{пот} + Q_{от}). \quad (9)$$

Показатели эффективности установки с учетом [9, 10] оцениваются следующим образом.

Электрический КПД учитывает все виды потерь и не учитывает отпуск теплоты

$$\eta_e = \frac{N_e}{B_i Q_H^p}. \quad (10)$$

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, кг/(кВт·ч), рассчитывается по формуле

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_e}. \quad (11)$$

Коэффициент использования теплоты топлива

$$\eta = \frac{Q_e + Q_{от} + Q_{г.в}}{B_i Q_H^p}. \quad (12)$$

В (12) в числителе первое слагаемое учитывает отпуск только электроэнергии (электрический КПД), второе и третье слагаемые обеспечивают учет эффекта когенерации за счет отпуска теплоты на отопление и на нужды горячего водоснабжения.

Технические характеристики теплообменных аппаратов для утилизации теплоты отработавших дымовых газов представлены в табл. 1, а их внешний вид – на рис. 2. Теплообменник для нагрева воздуха – это аппарат пластинчатого типа, у которого оребрение расположено со стороны нагреваемого воздуха при реализации многократно перекрестного тока (рис. 2а). Теплообменник для нагрева воды (рис. 2б) представляет собой кожухотрубный аппарат, в котором по медным трубам диаметром 8 мм движется нагреваемая вода, а в межтрубном пространстве – дымовые газы.

При работе установки обеспечивалось измерение всех температур и расходов рабочих сред для определения тепловых потоков в соответствии с предлагаемой методикой. Схема измерений установки подробно представлена в [7]. Тепловой нагрузкой для отопления было помещение объемом

150 м³, в которое поступал нагретый воздух. Тепловая нагрузка по горячему водоснабжению обеспечивалась непрерывным сливом нагретой в теплообменнике сетевой воды, а уходящие газы через газоход выводились в атмосферу.

Таблица 1

Технические характеристики теплообменных аппаратов

Technical characteristics of heat exchangers

Наименование показателя	Тип аппарата	
	Газо-газовый	Газо-водяной
Тепловая мощность, Вт	2700	3500
Расход дымовых газов, м ³ /с	0,0045	
Скорость дымовых газов, м/с	25	–
Расход воды, л/ч	–	220
Площадь поверхности нагрева, см ²	1100/2500*	1140
Материал труб/корпуса	Сталь/сталь	Медь/сталь
Площадь корпуса, см ²	1770	1032
Внешние размеры, мм	260×170×40	250×125×125
Температура газов: вход/выход, °С	410/80	410/77
Температура воды: вход/выход, °С	–	23/38
Температура воздуха: вход/выход, °С	64/95**	–

* Больше значение соответствует стороне оребрения.
** При расходе ~0,02 м³/с.

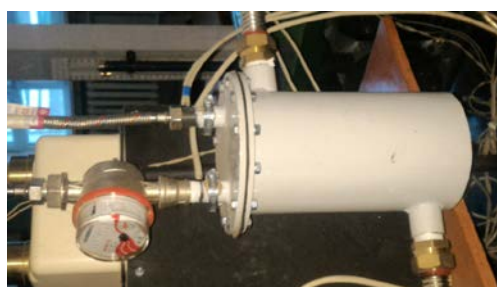
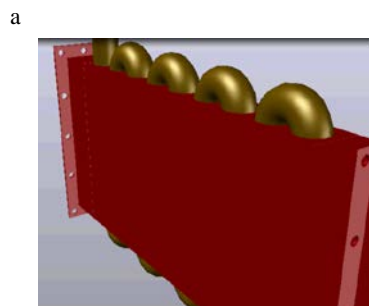
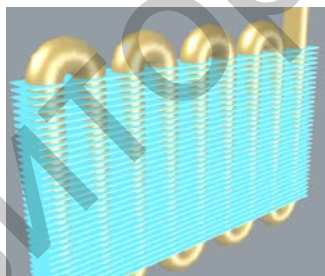


Рис. 2. Внешний вид теплообменных аппаратов: а – пластинчатый теплообменник для нагрева воздуха; б – кожухотрубный теплообменник для нагрева воды

Fig. 2. Outward appearance of heat exchangers: а – plate heat exchanger for heating the air; б – shell and tube heat exchanger to heat the water

Энергетическая диаграмма (рис. 3) работы установки иллюстрирует полезный эффект (стрелки вверх) и потери (стрелки вправо). КПД микроТЭС по отпуску электроэнергии составил $\eta_e \approx 22\%$, а остаточный член баланса $Q_{ост}$ включает в себя неполноту сжигания топлива на уровне 1,5 кВт ($> 14\%$).

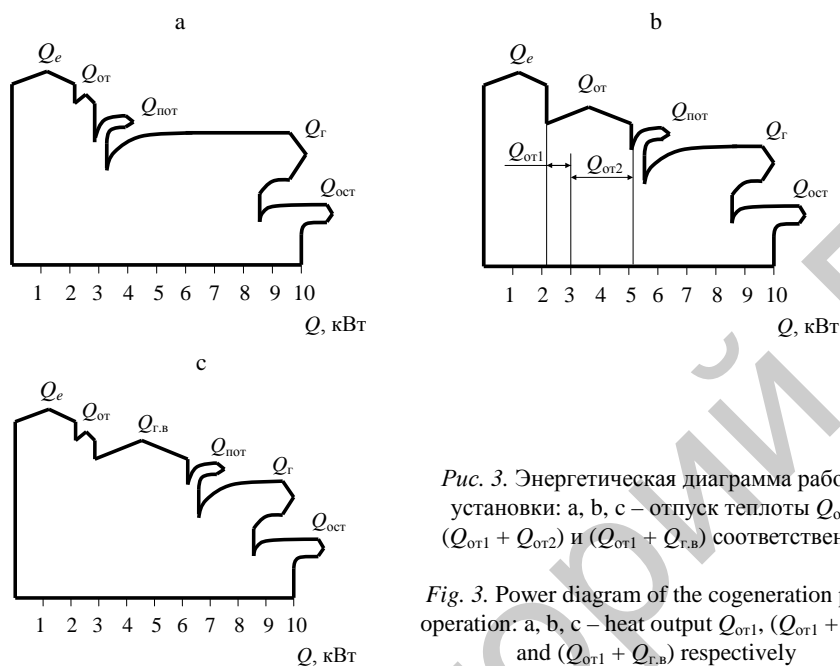


Рис. 3. Энергетическая диаграмма работы установки: а, б, с – отпуск теплоты $Q_{от1}$, $(Q_{от1} + Q_{от2})$ и $(Q_{от1} + Q_{г.в})$ соответственно

Fig. 3. Power diagram of the cogeneration plant operation: а, б, с – heat output $Q_{от1}$, $(Q_{от1} + Q_{от2})$ and $(Q_{от1} + Q_{г.в})$ respectively

По рис. 3 можно видеть, как меняется полезный эффект в зависимости от исполнения когенерационной установки. Следует отметить, что тепловой поток $Q_{г.в}$ (рис. 3с), по существу, является некоторым резервом исследуемой установки, который может быть использован после ее модернизации. Реальное применение когенерации для таких установок предпочтительно при нагреве воздуха внутри помещений, например технологический нагрев при малоэтажном строительстве в начальной стадии, когда отсутствует инфраструктура [8–11], нагрев штабной или медицинской палатки в зоне чрезвычайной ситуации и т. п. При этом воздух в теплообменник подают нагретым до $64\text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 1) за счет охлаждения головки цилиндра двигателя, температура которой составляет $77\text{ }^\circ\text{C}$. После теплообменника температура воздуха может меняться в зависимости от его расхода в диапазоне $70\text{--}95\text{ }^\circ\text{C}$.

Работа установки по схеме, представленной на рис. 1б, обеспечивает нагрев помещения объемом 150 м^3 на $3\text{ }^\circ\text{C}$ за 35–40 мин, а работа по схеме рис. 1с – увеличение теплового потока на отопление более чем в три раза (рис. 3б).

Когенерационный эффект растет с увеличением отопительной нагрузки (рис. 4), что очевидно и объясняется конструктивными особенностями бензогенераторов, когда независимо регулируется только электрическая нагрузка. Вместе с тем коэффициент использования теплоты топлива может быть увеличен с 0,22 до 0,50–0,60 для исследуемой установки (рис. 4). Некоторое снижение $\eta_{\text{нетто}}$ с ростом отопительной нагрузки обусловлено работой вентилятора, обеспечивающего перекачку нагреваемого воздуха и доставку его потребителю.

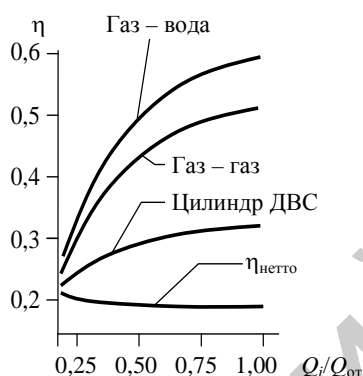


Рис. 4. Изменение эффективности (коэффициента использования теплоты топлива) микроТЭС в зависимости от отопительной нагрузки

Fig. 4. The alteration of efficiency (utilization rate of fuel heat) of a micro heat power plant, depending on the heating load

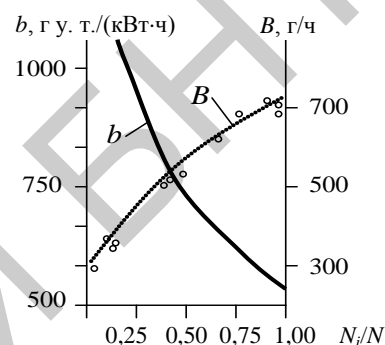


Рис. 5. Удельный (b) и массовый (B) расходы топлива теплоэнергетической установкой

Fig. 5. Specific (b) and mass (B) fuel consumption of thermal power plants

Расход топлива во всех случаях неизменен и не превышает 700 г/ч на нагрузках, близких к номинальным, что соответствует ~ 500 г у. т./кВт·ч отпускаемой электроэнергии (рис. 5). Отпуск теплоты в предложенном подходе является «даровым».

ВЫВОДЫ

1. Представлены основные методические положения для исследования микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением, в основе которых лежат балансовые уравнения.

2. Предложены технические решения, обеспечивающие повышение коэффициента использования теплоты топлива для микроТЭС на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением за счет когенерации.

3. Коэффициент использования теплоты топлива может быть увеличен с 0,22 до 0,50–0,60 в зависимости от варианта технического решения для установки мощностью 2,4 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Судавный, А. С. Развитие когенерации в контексте концепции интеллектуального распределения / А. С. Судавный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 8. С. 117–120.
2. Интеграционные технологии при создании малых электротехнических систем и комплексов на основе методологии когенерации / Л. Н. Ахтулова [и др.] // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 145–150.
3. Денисов-Винский, Н. Д. Мини-ТЭЦ как надежное средство решения проблемы энергообеспечения / Н. Д. Денисов-Винский // Энергобезопасность и энергосбережение. 2007. № 2. С. 10–18.
4. Ерофеев, В. Л. Термодинамические пределы энергоэффективности теплоэнергетических установок / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2013. № 2. С. 33–38.
5. Современное состояние когенерации в России: обзор публикаций, перспективное направление исследований / А. В. Казаков [и др.] // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов IV Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. Томск: Томский политехн. ун-т, 2013. С. 321–329.
6. Тонкошкур, А. Г. Обоснование принципов тригенерации на основе комбинирования ГТУ с АБХМ / А. Г. Тонкошкур, Е. И. Муслимов // Проблемы теплоэнергетики: сб. науч. трудов по материалам XII междунар. науч.-техн. конф. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2014. Вып. 3. С. 203–206.
7. Синельников, Д. С. Эффективность когенерационной теплоэнергетической установки на базе ДВС с воздушным охлаждением / Д. С. Синельников, П. А. Щинников // Теплоэнергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2015. Вып. 19. С. 159–167.
8. Щинников, П. А. Методика оценки технико-экономической эффективности когенерационных установок на базе ДВС с воздушным охлаждением / П. А. Щинников, В. Г. Томилов, Д. С. Синельников // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 134–143.
9. Ноздренко, Г. В. Тепловая электростанция на базе ДВС: метод. указания / Г. В. Ноздренко, Ю. И. Шаров, И. В. Бородихин. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2008. 39 с.
10. Григорьева, О. К. Расчет тепловых схем теплофикационных паротурбинных установок: метод. указания / О. К. Григорьева, О. В. Боруш. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2014. 63 с.
11. Щинников, П. А. Энергоснабжение при малоэтажном строительстве при отсутствии инфраструктуры = Power Supply in the Low-Rise Construction in the Lack of Infrastructure / П. А. Щинников, Д. С. Синельников // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 7. С. 58–64.

Поступила 03.03.2016 Подписана в печать 06.06.2016 Опубликована онлайн 31.01.2017

REFERENCES

1. Sudavniy A. S. (2014) Development of Cogeneration in the Context of the Concept of Intellectual Distribution. *Izvesiya Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskiye Nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], (8), 117–120 (in Russian).
2. Akhtulova L. N., Akhtulov A. L., Leonov E. N., Petukhova N. N., Smirnov S. I. (2014) Integration Technologies Used for Creation of Small Electrotechnical Systems and Complexes on the Basis of Cogeneration Methodology. *Omskiy Nuchniy Vestnik* [Omsk Science Herald], 130 (2), 145–150 (in Russian).

3. Denisov-Vinski N. D. (2007) Mini-CHP as a Reliable Remedy of Solving the Problems of Power Supply. *Energobezopasnost i Energosbieriezheniye* [Power Safety and Power Saving], (2), 10–18 (in Russian).
4. Yerofiev V. L., Pryakhin A. S. (2013) Thermodynamic Limits of Efficiency of Thermal Power Facilities. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova* [Herald of the State University of Sea and River Fleet Named After Admiral S. O. Makarov], (2), 33–38 (in Russian).
5. Kazakov A. V., Zavorin A. S., Novoselcev P. Ju., Tabakaev R. B. (2013) Present State of Cogeneration in Russia: a Review of Publications, a Promising Direction of Research. *Teplofizicheskie Osnovy Jenergeticheskikh Tehnologij. Sbornik Nauchnyh Trudov IV Vserossijskoj Nauchno-Prakticheskoy Konferencii s Mezhdunarodnym Uchastiem* [Thermophysical Fundamentals of Power Technologies. Collection of Scientific Papers IV All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 321–329 (in Russian).
6. Tonkoshkur A. G., Muslimov Ye. I. (2014) Justification of the Principles of Trigeneration Based on a Combination of GTU with AFM. *Problems of Heat Power Engineering: Collected Works of the XII International Scientific-and-Technical Conference*. Saratov, Saratov State Technical University, Issue 3, 203–206 (in Russian).
7. Sinelnikov D. S., Shchinnikov P. A. (2015) The Efficiency of Cogeneration Heat and Power Facilities Based on Internal Combustion Engines with Air Coolin. *Heat Power Engineering: Collected Works*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., Issue 19, 159–167 (in Russian).
8. Shchinnikov P. A., Tomilov P. A., Sinelnikov D. S. (2015) Method of Evaluation of Technical and Economic Efficiency of the Cogeneration Facilities Based on Internal Combustion Engines with Air Cooling. *Nauchny Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Science Herald of Novosibirsk State Technical University], (2), 134–143 (in Russian).
9. Nozdrenko G. V., Sharov Yu. I., Borodikhin I. V. (2008) *Thermal Power Plant Based on of the Internal Combustion Engine*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. 39 (in Russian).
10. Grigorieva O. K., Borush O. V. (2014) *Calculation of Thermal Schemes of Cogeneration Steam Turbines*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ. 63 (in Russian)
11. Shchinnikov P. A., Sinelnikov D. S. (2015) Power Supply of Low-Rise Construction in the Absence of Infrastructure. *Izvestija Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], (7), 58–64 (in Russian).

Received: 3 March 2016

Accepted: 6 June 2016

Published online: 31 January 2017