

**СОВМЕСТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛОТЫ НА БАЗЕ
КАРБЮРАТОРНОГО ДВС С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ****П.А. ЩИННИКОВ, Д.С. СИНЕЛЬНИКОВ**

Новосибирский государственный технический университет

В статье рассматриваются основные положения методики исследования микро-ТЭС на базе ДВС с воздушным охлаждением и когенерацией, в основе которых лежат уравнения энергобалансов. Для установки на базе ДВС Хитачи мощностью 2,4 кВт проведено исследование, в котором показана эффективность применения когенерации в виде полезного использования теплового потока от охлаждающего головку цилиндра воздуха с последующим нагревом его за счет утилизации теплоты дымовых газов в дополнительном пластинчатом теплообменнике. В этом случае коэффициент использования теплоты топлива может быть увеличен более, чем в два раза. Кроме того, рассмотрены основные положения методики технико-экономического сравнения когенерационной микро-ТЭС с тепловыми пушками. Показано, что микро-ТЭС с когенерацией эффективнее бензогенератора в сочетании с тепловой пушкой и за счет экономии затрат на топливо может обновляться каждые четыре года.

Ключевые слова: микро-ТЭС, когенерация, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), воздушное охлаждение, тепловая пушка, методика, результаты, эффект, коэффициент полезного действия.

Развитие энергетики сегодня обеспечивается, в том числе, развитием малой генерации. Одним из вариантов развития мини- и микро-ТЭС являются когенерационные энергетические установки на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением. Такие ДВС часто используют для привода генераторов электрического тока в микроэнергетических установках (микро-ТЭС) мощностью от 0,8 до 15 кВт. Различают двигатели карбюраторные и газопоршневые. В качестве топлива используют высокооктановый бензин с теплотой сгорания около 44 МДж/кг, природный газ с теплотой сгорания около 36 МДж/кг (~26 МДж/м³) или пропан-бутановую смесь с теплотой сгорания около 46 МДж/кг (~104 МДж/м³) соответственно. Эффективность таких установок, как правило, невысока (не превышает 22-24 %), а область использования разнообразна.

Годовой совокупный объем рынка для России, с учетом данных [1, 2], можно оценить в 18-24 млрд. руб. и прогнозируется его рост.

Преимущественное распространение получили микро-ТЭС карбюраторного типа (или бензогенераторы). Такие установки применяются в любое время года в зонах с отсутствием инфраструктуры, например, в начальной стадии малоэтажного строительства, в личном (дачном, подсобном) хозяйстве, в зонах ликвидации пожаров, последствий паводков, землетрясений или иных чрезвычайных ситуаций, в геолого-разведке, военными и некоторыми другими специалистами. В отечественной печати практически полностью отсутствует информация исследования о подобных микро-ТЭС на базе ДВС с воздушным охлаждением, несмотря на высокий потенциал повышения их эффективности, в частности, путем когенерации (отпуск теплоты с охлаждающим двигателем воздухом).

В работах [3–5] авторами показано, что применение когенерации, за счет использования теплоты охлаждающего головки цилиндра потока воздуха, для микро-ТЭС на базе ДВС карбюраторного типа с воздушным охлаждением увеличивает коэффициент использования теплоты топлива η в 1,5–2 раза, при этом установка мощностью в 2,4 кВт за 30–35 минут способна повысить температуру воздуха в помещении объемом 150 м³ (например в штабной или медицинской палатке) на ~3 °С при $\eta=0,3$.

Анализ рабочего цикла двигателя показывает, что только часть теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, используется на полезную работу, остальная же часть составляет тепловые потери. Вместе с тем, в предлагаемой когенерационной установке большая часть тепловых потоков полезно используется, при этом предлагается утилизировать теплоту отработавших в цилиндре двигателя дымовых газов в специальном теплообменнике, рис.1. Таким образом, направляемый потребителю горячий воздух последовательно нагревается за счет охлаждения головки цилиндра двигателя и за счет утилизации теплоты дымовых газов.

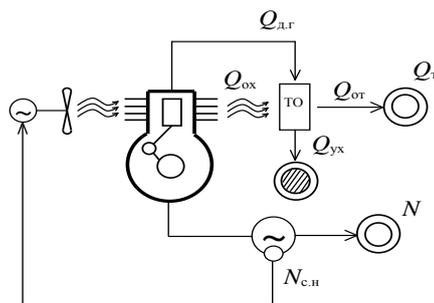


Рис. 1. Принципиальная схема микро-ТЭС с когенерацией на базе ДВС с воздушным охлаждением: ТО – теплообменник; Q_T , N , $N_{c.n}$ – теплота, электрическая и собственных нужд нагрузка соответственно; Q_{ox} , $Q_{от}$, $Q_{д.г.}$, Q_{yx} – тепловые потоки с воздухом, охлаждающим головку цилиндра двигателя, воздухом отпущаемым потребителю теплоты, дымовыми газами, отработавшими в камере сгорания двигателя, уходящими дымовыми газами соответственно

Распределение теплоты, полученной при сгорании вводимого в цилиндр топлива, называют тепловым балансом, который обычно определяется экспериментальным путем.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = Q_e + Q_{yx} + Q_{от} + Q_{пот} + Q_{ост}, \text{ кВ}, \quad (1)$$

где Q – теплота топлива, введенная в двигатель; Q_e – теплота, превращенная в полезную работу; $Q_{от}$ – теплота с охлаждающим агентом (водой или воздухом), направленная на нужды отопления; Q_{yx} – теплота, потерянная с отработавшими газами; $Q_{пот}$ – теплота, 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, кВт:

$$Q = \frac{B_i \cdot Q_p^H}{\tau}, \quad (2)$$

где B_i определяется по формуле

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

i – режим в зависимости от нагрузки; ρ – плотность топлива, кг/м^3 ($\rho=725-780 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкого топлива).

Теплота, превращенная в полезную работу, кВт:

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

Теплота, теряемая с отработавшими газами, кВт:

$$Q_{yx} = \frac{V_G \cdot c_{pg} \cdot t_G}{\tau}, \quad (5)$$

где V_G – расход газов, $\text{м}^3/\text{кг}$; c_{pg} – средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; t_G – температура отработавших газов, $^\circ\text{C}$; τ – время, сек.

Теплота, отведенная от ДВС обдувающим воздухом (отопительная нагрузка), и потери теплоты, кВт:

$$Q_{от} = Q_{от1} + Q_{от2} = \alpha \cdot F_{ц} \cdot \Delta t + V_B \cdot c_{pB} \cdot t_B; \quad (6)$$

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

где $F_{ц}$, $F_{то}$ – площадь поверхности головки цилиндра ДВС и поверхности теплообменника и газоотводных труб соответственно; α – коэффициент теплоотдачи; Δt – соответствующий температурный напор; V_B , c_{pB} , t_B – расход, изобарная теплоемкость и температура нагретого (отопительного) воздуха соответственно.

В выражении (6) теплота, направленная с воздухом на отопление, учитывает тепло от охлаждения головки цилиндра двигателя ($Q_{от1}$) и от охлаждения дымовых газов в специальном теплообменнике ($Q_{от2}$).

Остаточный член теплового баланса, кВт:

$$Q_{ост} = Q - (Q_e + Q_G + Q_{от} + Q_{пот}). \quad (8)$$

Показатели эффективности установки оцениваются, с учетом данных [5, 6], следующим образом.

Электрический КПД учитывает все виды потерь и не учитывает отпуск теплоты:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B_i \cdot Q_p^H}. \quad (9)$$

Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, $\text{кг/кВт}\cdot\text{ч}$:

$$b_y = \frac{0,123}{\eta_e}. \quad (10)$$

Коэффициент использования теплоты топлива:

$$\eta = \frac{Q_e + Q_{от}}{B_i \cdot Q_p^H}. \quad (11)$$

В этом выражении в числителе первое слагаемое учитывает отпуск электроэнергии (по нему определяют электрический КПД установки), второе – обеспечивает учет когенерации и отпуска теплоты.

С использованием разработанных методических положений проведено исследование микро-ТЭС мощностью 2,4 кВт на базе ДВС Хитачи. Установлено, что применение когенерации за счет использования охлаждающего головки цилиндра воздуха позволяет увеличить коэффициент использования теплоты топлива до $\eta \approx 0,3$. В то же время утилизация теплоты дымовых газов во вновь устанавливаемом теплообменнике позволит увеличить η до $\sim 0,5$ (рис. 2).

Некоторое снижение $\eta_{\text{нетто}}$ с ростом отопительной нагрузки обусловлено работой вентилятора, обеспечивающего перекачку нагреваемого воздуха и доставку его

потребителю. Следует отметить, что в реальной микро-ТЭС рост отопительной нагрузки связан, в первую очередь, с увеличением электрической нагрузки.

Расход топлива во всех случаях неизменен и не превышает 700 г/час на нагрузках, близких к номинальным, что соответствует ~500 г.у.т/кВт·ч отпускаемой электроэнергии (рис. 3).

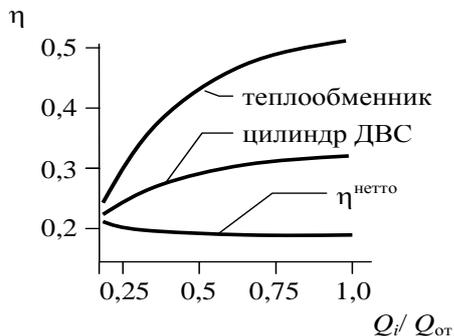


Рис. 2. Изменение эффективности (коэффициента использования теплоты топлива) микро-ТЭС в зависимости от отопительной нагрузки

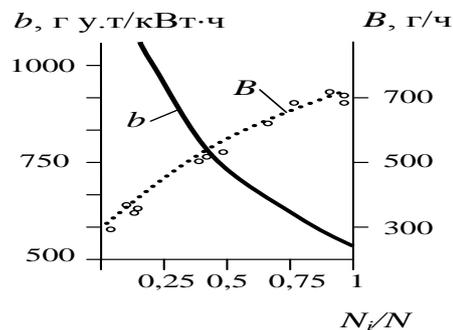


Рис. 3. Удельный (b) и массовый (B) расход топлива теплоэнергетической установкой

Расчетами определено, что собственно теплообменник может представлять собой пластинчатый аппарат, размещенный в кожухе (рис.4) с габаритными размерами 260×170×40 мм, что сопоставимо с размерами глушителя для ДВС.

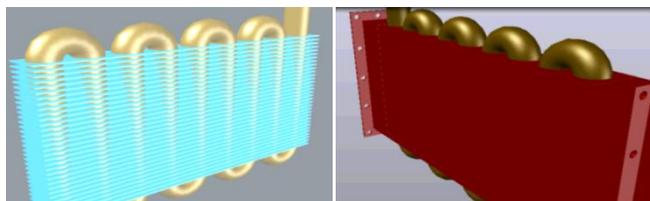


Рис. 4. Общий вид теплообменного аппарата

С другой стороны, бензогенератор на базе ДВС с когенерацией (рис. 1), вытесняет установку по отпуску теплоты в виде тепловой пушки. Тепловые пушки, в свою очередь, в качестве первичного ресурса могут потреблять органическое топливо для производства теплоты и электроэнергию на привод вентилятора, либо только электроэнергию для того и другого (рис. 5). В обоих случаях обеспечение теплотой потребует наличие бензогенератора.

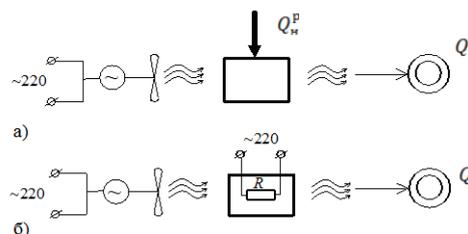


Рис. 5. Принципиальная схема тепловых пушек: а) на органическом топливе; б) с электронагревателем (R)

Тогда экономический эффект следует определять в условиях приведения вариантов к сопоставимому виду по отпуску продукции. В этом случае уравнения энергобаланса будут иметь вид (для случаев рис.5):

$$a: Q = B \cdot Q_H^P; \quad (12)$$

$$б: Q = N - N_{CH}. \quad (13)$$

В этих выражениях: B, Q_H^P – расход и низшая теплота сгорания топлива тепловой пушки на органическом топливе; N – подведенная электроэнергия к электрической тепловой пушке; N_{CH} – мощность вентилятора.

Технико-экономические показатели представленных на рынке тепловых пушек и бензогенераторов показаны в таблице.

Таблица

Стоимостные и расходные характеристики оборудования

Наименование показателя	Тепловые пушки		
	жидкое топливо	газ	электроэнергия
Удельная стоимость, руб./кВт (\$/кВт)	~1000 (18-20)	~250 (4,5-5)	~500 (9-10)
Расход топлива, (л/ч) на кВт установленной мощности	~0,09		–
	Бензогенераторы		
Удельная стоимость, руб./кВт (\$/кВт)	~8400 (150-170)		
Удельный расход топлива, г у.т./кВт·ч	375-650		

Экономический эффект при сравнении вариантов, энергосбережения, возможно определить через затратный механизм, который учитывает затраты на топливо Z_1 и Z_4 при генерации двух видов продукции, затраты (капиталовложения) на бензогенератор Z_2 и в тепловую пушку Z_3 (рис. 6).

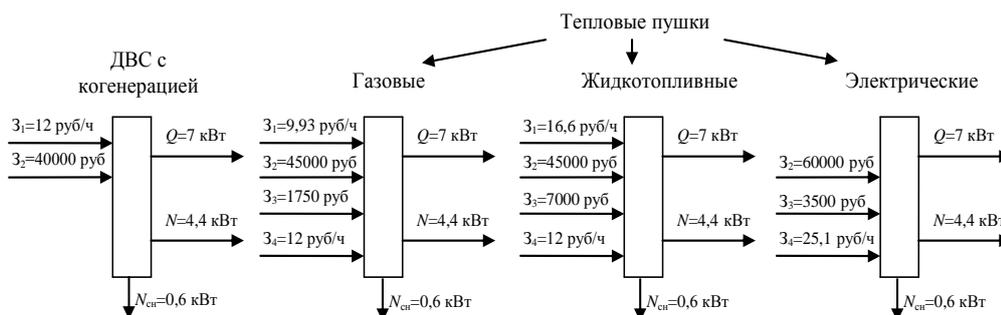


Рис. 6. К определению технико-экономического эффекта разных вариантов энергосбережения

В этом случае экономический эффект определяется как разность в сумме затрат между вариантами:

$$\Theta = \Delta Z = \sum_i Z - \sum_j Z, \quad (14)$$

где i, j – слагаемые затрат сравниваемых вариантов.

В свою очередь составляющие затрат определяют по следующим выражениям:

$$Z_1 = C_T \cdot B_1; \quad (15)$$

$$Z_2 = K_y^N \cdot N_y; \quad (16)$$

$$Z_3 = K_y^Q \cdot N_Q; \quad (17)$$

$$Z_4 = C_T \cdot B_4. \quad (18)$$

В этих выражениях C_T – цена топлива; B_1 – расход топлива основной установкой (бензогенератором или тепловой пушкой); B_4 – расход топлива замещающим бензогенератором; K_y^N, K_y^Q – удельные капиталовложения в бензогенератор и тепловую пушку соответственно; N_y, N_Q – установленные мощности бензогенератора и тепловой пушки соответственно.

Эффект от применения когенерации для условий (см. рис. 6) при стоимости бензина 30 руб./л, газа 18 руб./л, розничных цен на оборудование и при 1000 часов работы в году (например, 3–4 месяца работы строительной бригады на объекте) представлен на рис.7. Несложные расчеты показывают, что экономический эффект (Э) может составить от 40 до 64 тыс.руб. при сроке службы 4 года. Это означает, что, при сложившейся конъюнктуре цен на топливо и розничных ценах на оборудование, за счет экономии можно каждые четыре года полностью обновлять установку, даже при ее работе 3–4 месяца в году.

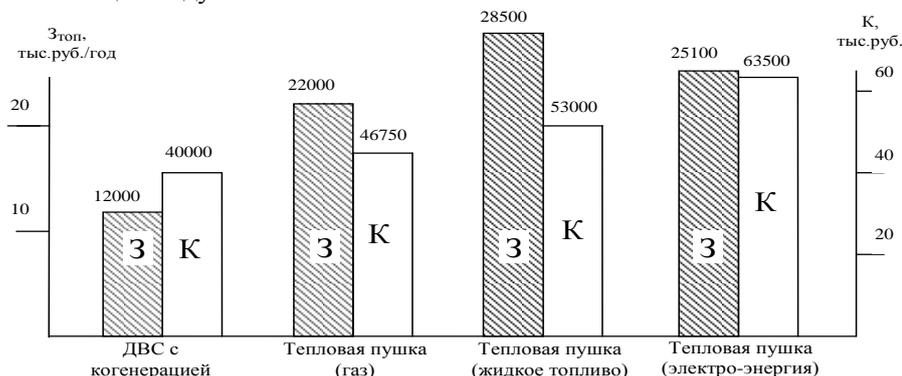


Рис. 7. Переменная и капитальная составляющие эффекта от применения ДВС с воздушным охлаждением и когенерацией по сравнению с тепловыми пушками: З – затраты на топливо; К – капиталовложения

Выводы:

1. Представлены основные положения методики исследования опытной когенерационной теплоэнергетической установки на базекарбюраторного ДВС с воздушным охлаждением, в основе которой использован механизм энергобалансов.

2. Показана работоспособность методики на различных нагрузках работы установки. Показано, что когенерация для мини-ТЭС на базе ДВС с воздушным охлаждением после установки специального пластинчатого теплообменника, для утилизации теплоты уходящих газов, позволит увеличить коэффициент использования теплоты топлива до $\eta=0,5$.

3. Представлены основные положения методики оценки технико-экономической эффективности таких установок, в основе которой лежит затратный механизм и приведение вариантов к сопоставимому виду по энергетическому эффекту. Показано, что бензогенератор с когенерацией эффективнее бензогенератора в сочетании с

тепловой пушкой и за счет экономии затрат на топливо может обновляться каждые четыре года.

Summary

The article shows the main provisions of research methodology of micro-thermal power plants based on the internal combustion engine with air cooling and cogeneration which are based on energy balance equation. For technical plant based on the internal combustion engine capacity of 2.4 kW Hitachi conducted a study, which shows the efficiency of cogeneration in the form of useful heat flow from the cylinder head cooling air and then heating it by utilizing the heat of flue gases in an additional plate heat exchanger. In this case, the fuel heat utilization factor can be increased more than twice. Furthermore, the main provisions of technique feasibility comparison of micro-cogeneration thermal power plants with a heat gun were considered. It is shown that micro-thermal power plants with cogeneration is more efficient than gasoline generator in combination with a heat gun, and through savings in fuel costs, and can be renewed every four years.

Keywords: *micro thermoelectric power station, cogeneration, internal combustion engine, air-cooled, heat gun, technique, results, effect, efficiency.*

Литература

1. Анализ рынка генераторов электроэнергии (электрогенераторов) бензиновых в России / Опубликовано 07.10.2014. Чтение с экрана. <http://www.giac.ru/PressRelease/PressReleaseShow.asp?id=523511>.
2. Филиппов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика. 2009. №8. С.38–44.
3. Щинников П.А., Томилов В.Г., Синельников Д.С. Методика оценки технико-экономической эффективности когенерационных установок на базе ДВС с воздушным охлаждением // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 134–143.
4. Щинников П.А., Синельников Д.С. Энергоснабжение при малоэтажном строительстве при отсутствии инфраструктуры = Powersupplyinthelow-riseconstructioninthelackofinfrastructure// Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 7. С. 58–64.
5. Синельников Д.С., Щинников П.А. Эффективность когенерационной теплоэнергетической установки на базе ДВС с воздушным охлаждением // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. Вып.19. С.159–167.
6. Ноздренко Г.В., Шаров Ю.И., Бородихин И.В. Тепловая электростанция на базе ДВС: Методические указания. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 39 с.
7. Григорьева О.К., Борущ О.В. Расчет тепловых схем теплофикационных паротурбинных установок: Методические указания. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 63 с.

Поступила в редакцию

30 августа 2016 г.

Щинников Павел Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Тел.: 8(913)914-00-53. E-mail: tes.nstu@gmail.com.

Синельников Денис Сергеевич – студент кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Тел.: 8(913)896-78-75. E-mail: sinelnikovden@hotmail.com.