

## КОМБИНИРОВАННАЯ МИНИ-ТЭС НА БАЗЕ ГАЗОПОРШНЕВОЙ УСТАНОВКИ И ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

П.А. ЩИННИКОВ, Н.В. МАРАСАНОВ

Новосибирский государственный технический университет

*В статье предлагается технологическая схема комбинированной мини-ТЭС на основе газопоршневой установки и паровой турбины, которая может быть востребована в рамках реализации местных или распределенных систем электроснабжения. Показано, что такая мини-ТЭС может быть выполнена в блочно-модульной компоновке, а ее КПД составит не менее 50% даже без учета оптимизации термодинамических, схемных и конструктивно-компоновочных параметров. Показано, что себестоимость продукции у комбинированной мини-ТЭС на  $\approx 8\%$  ниже, чем у газопоршневой установки при работе в автономном режиме.*

*Ключевые слова:* газопоршневая установка, ДВС, паровая турбина, распределенная энергетика.

Одним из путей развития энергетики является малая генерация. Сегодня это направление находит все более широкое применение в нашей стране [1–4]. Интерес представляют как технологии малой генерации в целом [4], так и отдельные процессы в них [5].

В статье предлагается новая технология производства электроэнергии на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и паровой турбины, которые связаны единым технологическим процессом. На рынке сегодня представлено большое количество двигателей внутреннего сгорания широкой линейки мощностей (от бензогенераторов мощностью 1–10 кВт до газопоршневых установок мощностью 1 – 4 МВт). Потребители охотно устанавливают такие установки в рамках местных, локальных или распределенных электроэнергетических систем. Часто совершенствование технологических процессов для подобных установок идет по пути создания когенерационных [6] и тригенерационных [7] систем, так как такие системы позволяют обеспечить повышение коэффициента использования топлива. Вместе с тем существует возможность повышения КПД энергоустановки по отпуску электроэнергии на базе ДВС при обеспечении принципа комбинирования, аналогичного парогазовым установкам (ПГУ). В этом случае «горячим источником» для паросилового контура комбинированной установки является выхлоп ДВС, а не газовой турбины (рис. 1).

Выхлопные газы газопоршневой установки 1 поступают в котел-утилизатор 2 и там нагревают питательную воду до состояния перегретого пара. Пар срабатывает в паровой турбине 3 и поступает в конденсатор 4. Затем основной конденсат проходит через теплообменник, где происходит его нагрев. Данный теплообменник обеспечивает утилизацию теплоты контура охлаждения ПГУ. В деаэраторе 6 основной конденсат очищается от газов, нагревается паром из отбора турбины и в виде питательной воды поступает в котел-утилизатор 2.

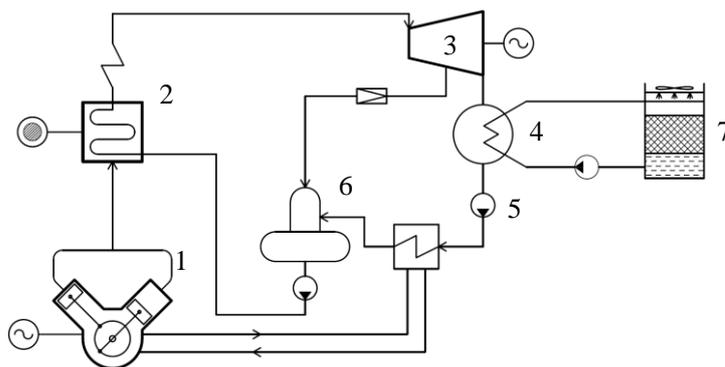


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной мини-ТЭС: 1 – газопоршневая установка (собственно ДВС); 2 – котел-утилизатор с дымовой трубой; 3 – паровая турбина; 4 – конденсатор; 5 – теплообменник рубашки охлаждения ДВС, необходимой для нормального функционирования двигателя; 6 – деаэрактор; 7 – вентиляторная градирня

Далее в статье предлагаются результаты расчетов технико-экономических параметров и характеристик основного оборудования предложенной технологии на базе газопоршневой установки *Jenbacher JMS 620 JS*. Выбор ГПУ обусловлен высоким, заявленным производителем, электрическим КПД и температурой выхлопных газов (табл. 1), так как последняя позволит обеспечить относительно высокую температуру острого пара в паросиловом контуре.

Таблица 1

Основные характеристики ГПУ *Jenbacher JMS 620 JS*

Наименование показателя	Величина
Номинальная мощность, кВт	3044
Расход топлива, м <sup>3</sup> /с	0,207
Электрический КПД, %	44,1
Расположение блоков	V-образное
Количество цилиндров, шт.	20
Диаметр цилиндра, мм	190
Ход поршня, мм	120
Объем двигателя, л	124,8
Объем выхлопных газов, м <sup>3</sup> /ч	13666
Температура выхлопных газов, °С	425
Габаритные размеры:	
длина, мм	8900
ширина, мм	2200
высота, мм	2800
Сухой вес, кг	12000
Удельная стоимость, \$/кВт	560

С учетом характеристик принятой к расчетам ГПУ параметры паросилового контура составят  $P_0 = 39$  бар;  $t_0 = 400^\circ\text{C}$ ;  $P_K \approx 0,1$  бар.

*Проблемы энергетики, 2016, № 11-12*

Котел-утилизатор может представлять собой конструкцию, состоящую из трех контуров и барабана, последовательно обеспечивающих нагрев воды, испарение, сепарацию пара и его перегрев (рис. 2).

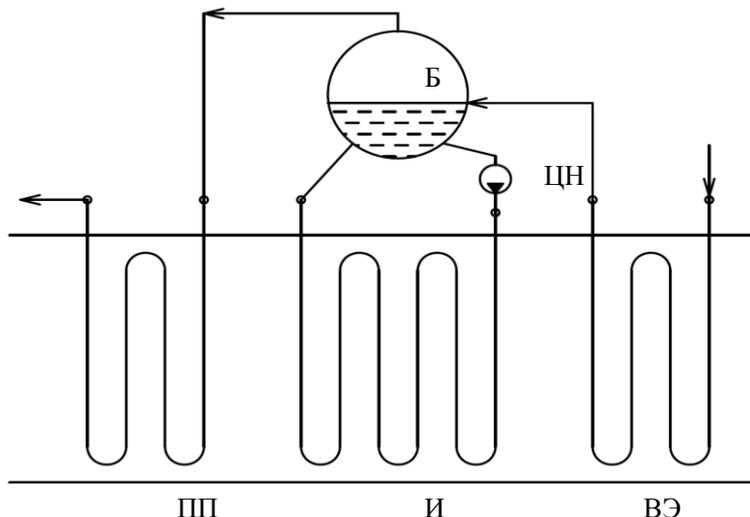


Рис. 2. Компоновочная схема котла-утилизатора: Б – барабан; ВЭ – водяной экономайзер; И – испаритель; ПП – пароперегреватель; ЦН – циркуляционный насос

В результате расчетов котла-утилизатора, проведенных с учетом положений [8], определены его тепловая мощность, паропроизводительность и некоторые другие характеристики (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики котла-утилизатора	
Наименование параметра	Величина
Тепловая мощность котла, МВт	1,57
Паропроизводительность, т/ч	2,0
Давление пара в барабане, бар	43
Давление острого пара, бар	39
Температура острого пара, °С	400
Температура питательной воды, °С	111
Расход газов, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$	13,6
Температура газов на входе, °С	425
Температура уходящих газов, °С	167
Поверхность нагрева, $\text{м}^2$	
водяного экономайзера	90
испарителя	141
пароперегревателя	25
Площадь сечения для прохода газов, $\text{м}^2$	
водяного экономайзера	1,13

испарителя	1,26
пароперегревателя	1,26
Площадь сечения для пара и воды, м <sup>2</sup>	
водяного экономайзера	0,0021
испарителя	0,0079
пароперегревателя	0,0039
Диаметр труб, $d_n/d_{вн}$ , мм	32/26
Габаритные размеры, м	
Длина	11,4
Ширина	5
Высота (без учета барабана)	6

Можно видеть, что, во-первых, теплового потока от покидающих ГПУ дымовых газов достаточно для того, чтобы сгенерировать около 2 т/ч пара с температурой  $\approx 400^\circ\text{C}$ , во-вторых, габаритные размеры котла-утилизатора позволяют выполнить его в модульной компоновке.

Дальнейшими расчетами показано, что полученный в котле-утилизаторе острый пар позволяет обеспечить работу паровой турбины мощностью около 0,5 МВт. Конструкторский расчет паровой турбины [9] позволил сформировать схему проточной части (рис. 3), из которой видно, что турбина имеет ступень скорости, десять активных ступеней и один нерегулируемый отбор для обеспечения работы деаэратора. Термодинамические и конструктивные характеристики турбины представлены в табл.3.

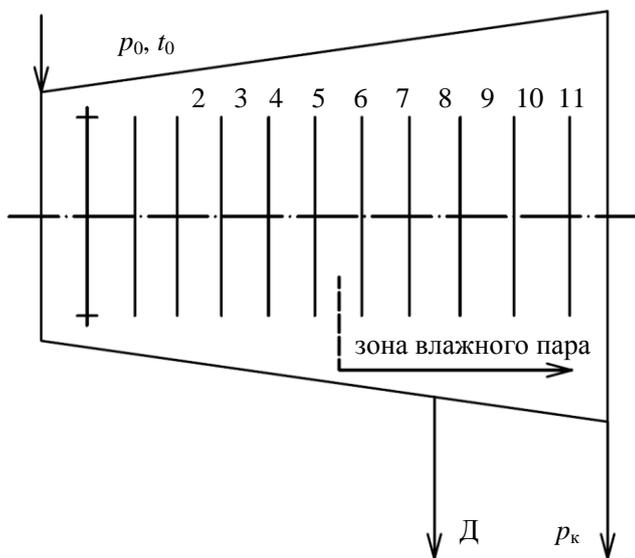


Рис. 3. Схема проточной части турбины с указанием отбора

Таблица 3

Характеристики паровой турбины	
Наименование параметра	Величина
Мощность турбины, кВт	475
Расход пара, кг/с	0,566
Давление пара перед/после стопорного клапана, МПа	3,9/3,78
Располагаемый теплоперепад, кДж/кг	1064
Давление в конденсаторе, кПа	10
Давление в нерегулируемом отборе, МПа	0,15
Расход пара в нерегулируемом отборе, кг/с	0,0021
Число ступеней, шт	11
Внутренний относительный КПД, %	78
Высота лопаток последней ступени, мм	87
Периферийный диаметр последней ступени, мм	550
Длина ротора турбины, мм	1380

Можно видеть, что габаритные характеристики паровой турбины также позволяют выполнить её в блочно-модульном варианте.

Следует отметить, что для предлагаемой установки основным видом топлива является газ, при этом содержание оксидов азота в выхлопных газах не превышает 250 мг/м<sup>3</sup>, а высота дымовой трубы по расчету составляет около 10 м при обеспечении ПДК в приземном слое атмосферы и с учетом фоновое загрязнение, характерного для городских территорий.

Несложно оценить коэффициент полезного действия по отпуску электроэнергии предложенной комбинированной энергетической установки:

$$\eta = \frac{N_{\text{ГПУ}} + N_{\text{ПТУ}}}{B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ГПУ}}$  – мощность газопоршневой установки, МВт;  $N_{\text{ПТУ}}$  – мощность паротурбинной установки, МВт;  $B$ ,  $Q_{\text{H}}^{\text{P}}$  – расход, кг/с и низшая теплота сгорания топлива (МДж/кг) топлива.

КПД составит  $\eta=50\%$ , что на  $\approx 6\%$  выше, чем у заявленного КПД ГПУ *JenbacherJMS 620 JS*, и достаточно близок к показателям современных мощных парогазовых установок. При этом столь высокий показатель эффективности использования топлива обеспечен без любого рода оптимизации как термодинамических параметров комбинированной тепловой схемы установки в целом, так и термодинамических и конструктивно-компоновочных характеристик её силовых агрегатов.

Кроме энергетической эффективности предложенной схемы интерес представляют и некоторые технико-экономические оценки. В статье предлагаются оценки расходов электроэнергии на собственные нужды установки [10] и оценки капиталовложений в основное оборудование. При этом капиталовложения в котел-утилизатор определены по массе основного металла:

$$K_{\text{КУ}} = k_1 k_2 k_3 V \rho \Pi, \quad (2)$$

В этом выражении  $V$  – объем металла поверхностей нагрева и барабана, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi$  – цена металла, руб/кг;  $k_1$  – коэффициент запаса, учитывающий затраты на необогреваемые трубы;  $k_2$  – коэффициент запаса,

учитывающий затраты на каркас, обмуровку и изоляцию;  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий затраты на изготовление.

Капиталовложения в паровую турбину, паропроводы и газопроводы, тягодутьевое оборудование, дымовую трубу, электрическую часть (эл. генератор, трансформатор, распредустройство, автоматику и КИП), низкочастотную группу определены по степенным зависимостям вида [12]

$$K = K_0 \cdot \prod_{i=1}^n c_i \cdot \prod_{j=1}^m \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \quad (3)$$

где  $K_0$  – базовые капиталовложения в соответствующую систему;  $c_i$  – коэффициенты приведения, учитывающие тип турбины (К, Т, ПТ, Р и др.), тип привода питательного насоса, тип градирни, регион строительства и другие подобные факторы;  $x_j^0$ ,  $x_j$  – базовые и текущие значения влияющих параметров и показателей в виде параметров пара, мощности турбины и генератора, коэффициента собственных нужд, расхода и давления питательной воды, числа часов использования установленной мощности, высоты дымовой трубы и т.п.;  $n_j$  – показатели степени;  $n$  – число коэффициентов приведения;  $m$  – число учитываемых влияющих параметров.

Себестоимость электроэнергии определена с учетом стоимости топлива (4300 руб/тыс. м<sup>3</sup>), отпуска электроэнергии с шин установки и издержек, руб/кВт·ч:

$$S_{э\text{э}} = \frac{I_{\text{т}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{рем}} + I_{\text{фот}}}{\text{Э}}. \quad (4)$$

В этом выражении  $I_{\text{т}}$ ,  $I_{\text{ам}}$ ,  $I_{\text{рем}}$ ,  $I_{\text{фот}}$  – издержки на топливо, амортизацию, ремонт и заработную плату соответственно, руб; Э, кВт·ч – отпущенная с шин энергоустановки электроэнергия.

Результаты технико-экономических оценок имеют оценочный характер, так как во многом зависят от текущей конъюнктуры цен на оборудование, топливо, материалы, курсов валют (при закупке оборудования за рубежом), инфляционных процессов и других факторов экономического характера. Вместе с тем, проведенные расчеты позволяют сделать предварительную оценку экономической эффективности предлагаемой мини-ТЭС на основе газопоршневой и паротурбинной установок (табл.4).

Таблица 4

Технико-экономические показатели мини-ТЭС	
Наименование показателя	Величина
Расход натурального топлива, м <sup>3</sup> /с	0,207
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/м <sup>3</sup>	34000
Число часов использования, час/год	6000
Установленная мощность, кВт	3519
Отпуск электроэнергии, кВт·ч/год	20,9·10 <sup>6</sup>
Коэффициент собственных нужд, от ед.	0,01
Мощность оборудования собственных нужд, кВт:	
принудительная циркуляция	4,0
тяга	8,2
циркуляционный насос	4,9
питательный насос	12,0

Продолжение таблицы 4

вентиляторная градирня	2,1
КПД установки нетто, %	50
Капиталовложения, руб	$80,3 \cdot 10^6$
В том числе:	
ГПУ	$68 \cdot 10^6$
Котел-утилизатор	$2,0 \cdot 10^6$
Паровая турбина	$6,1 \cdot 10^6$
Паропроводы и газопроводы	$0,124 \cdot 10^6$
Тяга и дутье	$0,156 \cdot 10^6$
Насосная группа	$0,326 \cdot 10^6$
Дымовая труба	$0,078 \cdot 10^6$
Электрическая часть вместе с КИПиА	$1,526 \cdot 10^6$
Низкопотенциальная группа с системой регенерации	$2,0 \cdot 10^6$
Издержки, руб/год	$26,02 \cdot 10^6$
В том числе:	
топливо	$19,3 \cdot 10^6$
амортизация	$3,2 \cdot 10^6$
ремонт	$1,2 \cdot 10^6$
ФОТ	$2,32 \cdot 10^6$
Себестоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	1,24
Себестоимость электроэнергии при работе ГПУ, руб/кВт·ч	1,34*
* при условии работы газопоршневой установки в автономном режиме и при сопоставимых исходных данных	

При всей условности технико-экономических оценок расчеты показывают, что комбинированная технология мини-ТЭС на базе ГПУ и паровой турбины может позволить снизить себестоимость электроэнергии на  $\approx 8\%$  по сравнению с работой ГПУ в автономном режиме даже без учета оптимизации параметров схемы и оборудования. Такой результат может представлять интерес при принятии решений о размещении местной, локальной или распределенной системы электроснабжения.

### Выводы

1. Представлена технология комбинированной мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины, которые объединены единым технологическим процессом, при этом генерацию пара ведут за счет сбросного тепла уходящих из ГПУ газов аналогично технологиям ПГУ, а теплота, отводимая от контура охлаждения ГПУ, используется в паросиловом контуре установки при нагреве основного конденсата.

2. В результате расчетов тепловой схемы установки, сформированной на основе газопоршневой установки мощностью 3 МВт, показано, что дополнительная мощность для выработки электроэнергии в паросиловом контуре составит  $\approx 0,5$  МВт, при этом КПД установки в целом по отпуску электроэнергии возрастет на 6% даже без учета оптимизации термодинамических, схемных и конструктивно-компоновочных параметров.

3. Конструкторские расчеты котла-утилизатора и паровой турбины с определением габаритов последних показывают, что данное оборудование может быть выполнено в блочно-модульном варианте.

4. Техничко-экономические оценки показывают, что себестоимость электроэнергии у предложенной комбинированной мини-ТЭС на  $\approx 8\%$  меньше, чем при работе ГПУ в автономном режиме.

### Summary

*The paper proposes a technological scheme of the combined mini-TPP on the basis of gas-piston installation and a steam turbine, which may be required as part of the local or distributed power systems. It is shown that such a mini-TPP can be made in a modular layout, and its efficiency is not less than 50%, even without taking into account the optimization of thermodynamic, structural and circuit design and layout options. It is shown that the cost of production at a combined mini-TPP on  $\approx 8\%$  lower than the installation of gas piston when working separately.*

**Keywords:** *gas-piston installation, ICE, steam turbine, distributed power generation.*

### Литература

1. Филиппов С.П. Малая энергетика в России. // Теплоэнергетика. 2009. №8. С. 38–44.
2. Щинников П.А., Синельников Д.С. Энергоснабжение при малоэтажном строительстве при отсутствии инфраструктуры // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. №7. С.58–64.
3. Щинников П.А., Бородихин И.В., Ноздренко Г.В. Комбинированная технология теплоснабжения на композитном жидком топливе с применением внутриквартальных двигателей внутреннего сгорания // Новости теплоснабжения 2002. №7. С. 47–49.
4. Майборода С.Э. Отходы как энергетика будущего // Твердые бытовые отходы. 2015 №8, С. 38–41.
5. Григорьев С.А., Григорьев А.С., Кулешов Н.В. и др. Энергоустановка с когенерацией электричества и тепла на основе возобновляемых источников энергии и электрохимических водородных систем // Теплоэнергетика. 2015. №2. С. 3–9.
6. Шадек Е.Г. Тригенерация как технология экономии энергоресурсов // Энергосбережение. 2015. №2. С. 52–57.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. СПб.: НПО ЦКТИ, 3-е изд. 1998. 256 с.
8. Щинников П.А. Проектирование одноцилиндровой конденсационной турбины: учебное пособие / П.А. Щинников. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 83 с.
9. Григорьева О.К., Боруш О.В. Расчет тепловых схем теплофикационных паротурбинных установок. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. 63 с.
10. Ларионов В.С., Ноздренко Г.В., Щинников П.А., Зыков В.В. Техничко-экономическая эффективность энергоблоков ТЭС: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. 31 с.

**Поступила в редакцию**

**17 октября 2016 г.**

**Щинников Павел Александрович** – д.т.н., профессор кафедры ТЭС Новосибирского государственного технологического университета (НГТУ). Тел. +7-913-914-0053. E-mail: tes.nstu@gmail.com.

**Марасанов Никита Владимирович** – аспирант кафедры ТЭС Новосибирского государственного технологического университета (НГТУ). Тел. +7-913-787-9417 E-mail: nikmarasanov@gmail.com.