

УДК 536.24

## ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ КОНВЕРТИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**А. В. ОВСЯННИК, А. В. ШАПОВАЛОВ, В. В. БОЛОТИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Комбинированная выработка тепла и электроэнергии нашла применение еще в годы становления СССР на предприятиях с теплоемкими технологическими процессами. Известно, что доля комбинированной выработки электроэнергии на ТЭЦ составляла в СССР свыше 60 %. Использование комбинированной выработки давало возможность значительно экономить топливо и получать при этом ощутимую прибыль, а также укладываться в рамки программы энергосбережения [1].

В Беларуси отрасль энергетики развивалась преимущественно по пути увеличения единичной мощности и параметров энергоблоков ТЭЦ. Большинство крупных промышленных регионов снабжается электрической и тепловой энергией от теплоэлектроцентралей. Тем не менее, уровень энергопотребления в республике на душу населения ниже, чем в развитых странах.

При отказе субъектов хозяйствования, имеющих мини-ТЭЦ, от резервирования мощностей в энергосистеме, эти субъекты вынуждены вводить в эксплуатацию дополнительное количество газотурбинных (газопоршневых) агрегатов для обеспечения непрерывного технологического процесса производства энергии [2].

Использование новой для Беларуси технологии производства электрической и тепловой энергии на базе конвертированных авиационных двигателей (АГТД) является особенно актуальным для небольших населенных пунктов. Благодаря созданию подобного независимого источника снабжения электроэнергией и теплотой появятся возможности по созданию, во-первых, новых рабочих мест, во-вторых, будут осваиваться новые подходы в области генерирующих источников энергии, в-третьих, качественно повысится уровень жизни населения из-за появления собственного источника снабжения электричеством и теплом, в-четвертых, будут созданы условия для увеличения производительности труда в небольших населенных пунктах. Огромным плюсом данных установок является их использование для погашения пиковых нагрузок на промышленных предприятиях.

Децентрализация энергоснабжения оказывается выгодной для конечного потребителя, который может быть владельцем независимого источника энергоснабжения.

### **Постановка задачи и цель**

Главной задачей работы является обоснование возможности создания теплоэлектроцентрали на базе конвертированного АГТД в составе газотурбинной установки (ГТУ), оценка экономического эффекта от внедрения АГТД в энергетику, анализ возможных путей дальнейшего развития источников энергоснабжения на базе авиационных двигателей в энергетике Беларуси с учетом социально-экономических факторов нашей республики и обоснование применения данных установок в составе крупных и средних ТЭЦ для погашения пиковых электрических нагрузок.

Целью работы является предложение нового пути развития генерирующих мощностей в Беларуси, характеризующегося децентрализацией энергопроизводства путем внедрения локальных источников снабжения потребителей энергоресурсами на базе комбинированной выработки теплоты и электроэнергии, наглядно показать, что существует подобный способ развития энергетики, который успешно применяется в других странах.

Тема работы является актуальной в силу того, что в ней рассматриваются вопросы создания теплоэлектроцентрали на базе турбовинтового двигателя АИ-20, и рассмотрен вариант создания газотурбинной теплоэлектроцентрали для производства тепла и электроэнергии на базе конвертированных АГТД, а поиск энергоэффективных технологий, путей их развития и внедрения в энергетику является одной из приоритетных задач для нашей страны. Создание таких установок не требует больших капиталовложений и характеризуется относительно небольшими сроками окупаемости.

### **Обзор авиационных газотурбинных установок**

Одним из удачных примеров применения АГТД в энергетике является теплофикационная ГТУ 25/39, установленная и находящаяся в промышленной эксплуатации на Безьянской ТЭЦ, расположенной в Самарской области в России, описание которой приведено ниже. Газотурбинная установка предназначена для выработки электрической и тепловой энергии для нужд промышленных предприятий и бытовых потребителей. Электрическая мощность установки – 25 МВт, тепловая – 39 МВт. Суммарная мощность установки – 64 МВт. Годовая производительность электроэнергии – 161,574 ГВт · ч/год, тепловой энергии – 244120 Гкал/год [3].

Установка отличается применением уникального авиационного двигателя НК-37, обеспечивающего КПД в 36,4 %. Такой КПД обеспечивает высокую эффективность установки, недостижимую на обычных тепловых электростанциях, а также ряд других преимуществ. Установка работает на природном газе с давлением 4,6 МПа и расходом 1,45 кг/с. Кроме электроэнергии установка производит 40 т/ч пара давлением 14 кгс/см<sup>2</sup> и нагревает 100 т сетевой воды от 70 до 120 °С, что позволяет обеспечить светом и теплом небольшой город [3].

При размещении установки на территории тепловых станций не требуется дополнительных специальных блоков химводоочистки, сброса воды и т. д.

Подобные газотурбинные энергетические установки незаменимы для применения в тех случаях, когда:

– необходимо комплексное решение проблемы обеспечения электрической и тепловой энергией небольшого города, промышленного или жилого района – модульность установок позволяет легко скомпоновать любой вариант в зависимости от нужд потребителя;

– осуществляется индустриальное освоение новых районов жизни людей, в том числе с условиями жизни, когда особо важна компактность и технологичность установки. Нормальная работоспособность установки обеспечивается в диапазоне температур окружающей среды от –50 до +45 °С при действии всех других неблагоприятных факторов: влажности до 100 %, осадках в виде дождя, снега и т. д.;

– важна экономичность установки: высокий КПД обеспечивает возможность производства более дешевой электрической и тепловой энергии и короткий срок окупаемости (около 3,5 лет) при капиталовложениях в строительство установки 10 млн 650 тыс. дол. США (по данным производителя).

Кроме того, установка отличается экологической чистотой, наличием многоступенчатого шумоподавления, полной автоматизацией процессов управления.

ГТУ 25/39 представляет собой стационарную установку блочно-контейнерного типа размером 21 м на 27 м. Для ее функционирования в варианте автономном от

существующих станций в комплекте с установкой должны находиться устройства химводоподготовки, открытое распределительное устройство для понижения выходного напряжения до 220 В или 380 В, градирня для охлаждения воды и отдельно стоящий дожимной газовый компрессор. При отсутствии необходимости в воде и паре конструкция установки сильно упрощается и удешевляется.

Сама установка включает в себя авиационный двигатель НК-37, котел-утилизатор типа ТКУ-6 и турбогенератор.

Полное время монтажа установки – 14 месяцев.

В России выпускается большое количество установок на базе конвертированных АГТД мощностью от 1000 кВт до нескольких десятков МВт, они пользуются спросом. Это подтверждает экономическую эффективность их использования и необходимость дальнейших разработок в этой области промышленности.

Установки, выпускаемые на заводах СНГ отличаются:

- низкими удельными капиталовложениями;
- блочным исполнением;
- сокращенным сроком монтажа;
- малым сроком окупаемости;
- возможностью полной автоматизации и др. [3].

#### **Характеристика ГТУ на базе конвертированного двигателя АИ-20**

Весьма популярной и наиболее часто применяемой является ГТУ на базе двигателя АИ-20. Рассмотрим газотурбинную ТЭЦ (ГТТЭЦ), относительно которой были проведены исследования и выполнены расчеты основных показателей.

Газотурбинная теплоэлектроцентраль ГТТЭЦ-7500/6,3 с установленной электрической мощностью 7500 кВт состоит из трех газотурбогенераторов с турбовинтовыми двигателями АИ-20 номинальной электрической мощностью 2500 кВт каждый.

Тепловая мощность ГТТЭЦ 15,7 МВт (13,53 Гкал/ч). За каждым газотурбогенератором установлен газовый подогреватель сетевой воды (ГПСВ) с оребренными трубами для подогрева воды отработавшими газами на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения населенного пункта. Через каждый экономайзер проходят отработавшие в авиационном двигателе газы в количестве 18,16 кг/с с температурой 388,7 °С на входе в экономайзер. В ГПСВ газы охлаждаются до температуры 116,6 °С и подаются в дымовую трубу.

Для режимов с пониженными тепловыми нагрузками введено байпасирование потока выхлопных газов с выводом в дымовую трубу. Расход воды через один экономайзер составляет 75 т/ч. Сетевая вода нагревается от температуры 60 до 120 °С и подается потребителям для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения под давлением 2,5 МПа [3].

Технические показатели ГТУ на базе двигателя АИ-20: мощность – 2,5 МВт; степень повышения давления – 7,2; температура газов в турбине на входе – 750 °С, на выходе – 388,69 °С; расход газов – 18,21 кг/с; количество валов – 1; температура воздуха перед компрессором – 15 °С. На основании имеющихся данных производим расчеты выходных характеристик ГТУ согласно алгоритму, приведенному в источнике [4].

Выходные характеристики ГТУ на базе двигателя АИ-20:

- удельная полезная работа ГТУ (при  $\eta_{\text{мех}} = 0,98$ ):  $H_e = 139,27$  кДж/кг;
- коэффициент полезной работы:  $\varphi = 0,3536$ ;
- расход воздуха при мощности  $N_{\text{ГТУ}} = 2,5$  МВт:  $G_k = 17,95$  кг/с;
- расход топлива при мощности  $N_{\text{ГТУ}} = 2,5$  МВт:  $G_{\text{топ}} = 17,95 \cdot 0,0119 = 0,21$  кг/с;
- суммарный расход выхлопных газов:  $g_r = 17,95 + 0,21 = 18,16$  кг/с;

- удельный расход воздуха в турбине:  $g_k = 0,00718$  кг/кВт;
- удельный расход теплоты в камере сгорания:  $q_1 = 551,07$  кДж/кг;
- эффективный КПД ГТУ:  $\eta_e = 0,2527$ ;
- удельный расход условного топлива на выработанную электроэнергию (при КПД генератора  $\eta_{ген} = 0,95$ ) без утилизации тепла выхлопных газов:  $b_{y,т} = 511,81$  г/кВт ч.

На основании полученных данных и в соответствии с алгоритмом расчета [4], можно перейти к получению технико-экономических показателей. Дополнительно задается следующим: установленная электрическая мощность ГТТЭЦ –  $N_{уст} = 7500$  кВт, номинальная тепловая мощность установленных на ГТТЭЦ ГПСВ –  $Q_{ГТЭЦ} = 15736,23$  кВт, расход электроэнергии на собственные нужды принят равным 5,5 %. В результате проведенных исследований и расчетов были определены следующие величины:

- коэффициент первичной энергии ГТТЭЦ брутто, равный отношению суммы электрической и тепловой мощностей ГТТЭЦ к производству удельного расхода топлива с низшей теплотой сгорания топлива,  $\eta_{ГТТЭЦ}^6 = 0,763$ ;
- коэффициент первичной энергии ГТТЭЦ нетто,  $\eta_{ГТТЭЦ}^H = 0,732$  [4];
- КПД выработки электрической энергии в теплофикационной ГТУ, равный отношению удельной работы газа в ГТУ к разнице удельного расхода теплоты в камере сгорания ГТУ на 1 кг рабочего тела и удельного отвода тепла в ГПСВ от 1 кг уходящих газов ГТУ,  $\eta_{ГТУ}^3 = 0,5311$ .

Теперь, когда имеются все необходимые данные, можно определить технико-экономические показатели ГТТЭЦ [4].

Расход условного топлива на выработку электроэнергии в теплофикационной ГТУ:

$$B_{ГТУ}^3 = \frac{0,123}{\eta_{ГТУ}^3}. \quad (1)$$

$$B_{ГТУ}^3 = \frac{0,123}{0,5311} = 231,6 \text{ г у. т./кВт} \cdot \text{ч.}$$

Часовой расход условного топлива на выработку электроэнергии:

$$B_{ч}^3 = b_{ГТУ}^3 N_{ГТУ}. \quad (2)$$

$$B_{ч}^3 = 0,2316 \cdot 2500 = 579 \text{ кг у. т./ч.}$$

Часовой расход условного топлива в ГТУ:

$$B_{ч,ГТУ}^{3,y} = g_{топ} \cdot \frac{Q_p^H}{Q_p^y} \cdot 3600.$$

$$B_{ч,ГТУ}^{3,y} = 0,21 \cdot \frac{48340}{29330} \cdot 3600 = 1246 \text{ кг у. т./ч.} \quad (3)$$

где  $g_{топ}$  – расход натурального топлива в ГТУ, кг/с;  $Q_p^H$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $Q_p^y$  – низшая теплота сгорания условного топлива, кДж/кг.

На выработку теплоты в соответствии с «физическим методом» относится оставшееся количество условного топлива:

$$B_{ч}^T = B_{ч,ГТУ}^{3,y} - B_{ч}^3. \quad (4)$$

$$B_{\text{ч}}^{\text{т}} = 1246 - 579 = 667 \text{ кг у. т./ч.}$$

Тогда удельный расход условного топлива на выработку 1 Гкал теплоты в теплофикационной ГТУ составит:

$$B_{\text{ГТУ}}^{\text{т}} = \frac{B_{\text{ч}}^{\text{т}}}{q_{\text{ГПСВ}}}. \tag{5}$$

$$B_{\text{ГТУ}}^{\text{т}} = \frac{667}{4,51} = 147,89 \text{ кг у. т./ч,}$$

где  $q_{\text{ГПСВ}}$  – тепловая мощность ГПСВ, Гкал/ч.

Технико-экономические показатели мини-ТЭЦ приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Технико-экономические показатели мини-ТЭЦ на базе конвертированного АГТД АИ-20, реализуемого за счет собственных средств**

Наименование показателей	Единица измерения	Величина
Установленная электрическая мощность	МВт	3 · 2,5
Установленная тепловая мощность	МВт	15,7
Удельные капитальные вложения на единицу электрической мощности	млн р./кВт · ч	4,036950
Годовой отпуск электроэнергии	кВт · ч	42,525 · 10 <sup>6</sup>
Годовой отпуск теплоты	Гкал	47357,53
Себестоимость единицы электроэнергии	р./кВт · ч	371,9
теплоты	р./Гкал	138700
Балансовая (валовая) прибыль	млн р.	19348,52
Срок окупаемости капиталовложений	лет	6,3
Точка безубыточности	%	34,94
Рентабельность (общая)	%	27,64
Внутренняя ставка доходности	%	50,54

Экономические расчеты показывают, что срок окупаемости капиталовложений в установки комбинированного производства электроэнергии и теплоты с АГТД составляет до 7 лет при реализации проектов за собственные средства. При этом срок строительства может составлять от нескольких недель при монтаже небольших установок электрической мощностью до 5 МВт, до 1,5 лет при вводе установки электрической мощностью 25 МВт и тепловой 39 МВт. Сокращенные сроки монтажа объясняются модульной поставкой электростанций на базе АГТД с полной заводской готовностью.

Таким образом, основные преимущества конвертированных АГТД, при внедрении в энергетику сводятся к следующим: низкие удельные капиталовложения в подобные установки, небольшой срок окупаемости, сокращенные сроки строительства, благодаря модульности исполнения (установка состоит из монтажных блоков), возможность полной автоматизации станции и др.

Для сравнения приведем примеры действующих газодвигательных мини-ТЭЦ в Республике Беларусь, их основные технико-экономические параметры указаны в табл. 2 [5].

Таблица 2

**Технико-экономические показатели газодвигательных мини-ТЭЦ,  
существующих в Республике Беларусь**

Показатели	«БЦЗ» 1-я очередь, г. Костюковичи, Могилевская обл.	ОАО «Полимир», г. Новополоцк, Витебская обл.	ОАО «Могилев- химволокно», г. Могилев	НПО «Интеграл», г. Минск
Установленная мощность, МВт	16	21	14,7	17,4
Годовая выработка электроэнергии, млн кВт · ч	190	160	116	139
Себестоимость электроэнергии, р./кВт · ч	476,76	389,76	373,23	358,44
Удельные капитальные вложения, млн р./кВт · ч	8,312650	9,091150	10,336750	13,078800
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	14,3	19,9	12,8	16,1
Экономический эффект предприятия, тыс. дол. США	33596,6	55636,8	44651,3	62799

Произведя сравнение, нетрудно заметить, что на фоне уже действующих установок газотурбинные установки на базе конвертированных авиационных двигателей имеют ряд преимуществ. Рассматривая АГТУ в качестве высокоманевренных энергетических установок, необходимо иметь и виду возможность их значительной перегрузки путем перевода на парогазовую смесь (за счет впрыска воды в камеры сгорания), при этом можно достигнуть почти трехкратного увеличения мощности газотурбинной установки при относительно небольшом снижении ее коэффициента полезного действия [6].

Эффективность этих станций значительно возрастает при их размещении на нефтяных скважинах, с использованием попутного газа, на нефтеперерабатывающих заводах, на сельскохозяйственных предприятиях, где они максимально приближены к потребителям тепловой энергии, что снижает потери энергии при ее транспортировке [7].

**Показатели маневренности ГТУ на базе конвертированного ГТД АИ-20**

Для покрытия остропиковых нагрузок перспективным является применение простейших стационарных авиационных ГТУ. У обычной газовой турбины время до принятия нагрузки после старта составляет 15–17 мин. Газотурбинные станции с авиационными двигателями очень маневренны, требуют малого (4–15 мин) времени на пуск из холодного состояния до полной нагрузки, могут быть полностью автоматизированы и управляться дистанционно, что обеспечивает их эффективное использование в качестве аварийного резерва. Длительность пуска до взятия полной нагрузки действующих газотурбинных установок составляет 30–90 мин.

Показатели маневренности ГТУ на базе конвертированного ГТД АИ-20 представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Показатели маневренности ГТУ на базе конвертированного ГТД АИ-20

Показатели маневренности	
Время автоматического пуска ГТУ из прогретого состояния с выходом на режим холостого хода, включая режим вентиляции продолжительностью 300 с	не более 7 мин
Время работы ГТУ на режиме прогрева	не более 5 мин
Время пуска и нагружения ГТЭС, от момента подачи команды на запуск ГТУ до готовности принять нагрузку	не более 12 мин

**Заключение**

На основании проведенной работы и полученных результатов исследования газотурбинных установок на базе конвертированных АГТД, можно сделать следующие выводы: 1. Эффективным направлением развития теплоэнергетики Беларуси является децентрализация энергоснабжения с применением конвертированных АГТД, и наиболее эффективной оказывается комбинированная выработка теплоты и электроэнергии. 2. Установка АГТД может работать как автономно, так и в составе крупных промышленных предприятий и крупных ТЭЦ, как резерв для принятия пиковых нагрузок, имеет небольшой срок окупаемости и сокращенные сроки монтажа. Нет сомнений, что данная технология имеет перспективу развития в нашей стране.

**Литература**

1. Хусаинов, Р. Р. Работа ТЭЦ в условиях оптового рынка электрической энергии / Р. Р. Хусаинов // Энергетик. – 2008. – № 6. – С. 5–9.
2. Назаров, В. И. К вопросу расчета обобщенных показателей на ТЭЦ / В. И. Назаров // Энергетика. – 2007. – № 6. – С. 65–68.
3. Уваров, В. В. Газовые турбины и газотурбинные установки / В. В. Уваров. – М. : Высш. шк., 1970. – 320 с.
4. Самсонов, В. С. Экономика предприятий энергетического комплекса / В. С. Самсонов, М. А. Вяткин. – М. : Высш. шк., 2003. – 416 с.
5. Ковалев, Л. И. Условно-проектная эффективность мини-ТЭЦ и анализ фактических результатов их эксплуатации в Республике Беларусь / Л. И. Ковалев // Энергосовет. – 2012. – № 5 (24). – С. 72–76.
6. Ковалев, Л. И. Выбор критерия эффективности при строительстве мини-ТЭЦ / Л. И. Ковалев // Энергоэффективность. – 2008. – № 3. – С. 10–12.
7. Ковалев, Л. И. Дешевизна малой энергетики – миф или реальность? / Л. И. Ковалев // Мировая энергетика. – 2008. – № 11. – С. 54–55.

Получено 04.02.2013 г.