УДК 697.1 (07)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

С.К. Абильдинова

Алматинский университет энергетики и связи
Казахстан 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 122
тел.: +7 702 167 5466; e-mail: saule18kz@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.05.004

Заключение совета рецензентов: 30.03.15 Заключение совета экспертов: 03.04.15 Принято к публикации: 08.04.15

Рассмотрена работа моноблочной тригенерационной экспериментальной установки для энергоснабжения автономных объектов. В состав установки входят энергосиловой агрегат в виде дизель-генератора, геотермальные тепловые насосы как источники тепло и хладоснабжения, котел-утилизатор тепла выхлопных газов.

Компрессоры тепловых насосов имеют привод от вала дизельного двигателя посредством клиноременных передач. На предлагаемой установке энергоснабжение автономных потребителей может быть организовано в режимах моногенерации, простой и сложной когенерации, а также тригенерации.

Приведены результаты экспериментального исследования энергетических показателей установки, подтверждающие ее работоспособность в режиме сложной когенерации. Значения коэффициента преобразования энергии, полученные в ходе испытания тепловых насосов в составе тригенерационной установки, показывают энергетическую эффективность их работы для режима теплоснабжения. Экспериментально определены составляющие энергобаланса установки и состав выхлопных газов при различных уровнях нагрузки потребителя.

Ключевые слова: моноблочная тригенерационная установка, дизель-генератор, геотермальные тепловые насосы, котел-утилизатор выхлопных газов.

THE STUDY OF MODES OF ALTERNATIVE ENERGY SYSTEMS WITH HEAT PUMPS BASED ON DIESEL GENERATOR

S.K. Abildinova

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
A-124 Building, 126 Baitursynuly Str., Almaty, 050013 Kazakhstan
ph.: 8 (727) 292 07 72; e-mail: saule18kz@mail.ru

Referred 30 March 2015 Received in revised form 3 April 2015 Accepted 8 April 2015

The article deals with the monoblocked trigeneration experimental plant for power supply of autonomic objects. The power plant consists of power unit in the form of a diesel generator, geothermal heat pumps as sources of heat and cold supply, heat recovery boiler of exhaust heat.

The heat pump compressors are driven from the shaft of the diesel engine through a V-belt transmission. On the proposed installation, the energy supply of autonomic consumers can be organized in monogenic, simple and complex cogeneration and trigeneration modes.

The article also demonstrates the results of experimental study of power plant characteristics, confirming its performance in complex cogeneration mode.

The values of the energy conversion factor, obtained during testing of heat pumps in the composition of trigeneration plants, show the energy efficiency of their work for the heating mode. The author experimentally identifies the components of the energy balance, and then the composition of the exhaust gases at different levels of the load.

Key words: monoblocked trigeneration plant, diesel generator, geothermal heat pumps, heat recovery boiler of exhaust heat.

Абильдинова Сауле Куанбековна
Saule K. Abildinova

Сведения об авторе: доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Алматинского университета энергетики и связи, Республика Казахстан.

Образование: КазГУ, физический факультет.

Область научных интересов: теплоэнергетика, низкотемпературные процессы и установки; тепловые насосы с электроприводом и приводом от тепловых двигателей; теплонасосные технологии в автономных и централизованных системах теплоснабжения.

Публикации: 23, в том числе в международных научных журналах.

Information about the author: Associate Professor of the Department "Industrial Power" of Almaty University of Power Engineering and Telecommunications.

Education: The Kazakh state University, physics faculty.

Research area: heat-and-power engineering; low temperature processes and installations; energy-heat pumps with electrically drive heat engines; heat pump technology in autonomic and centralized heat supply systems.

Publications: 23, including in international scientific journals.

Введение

Экономия и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), применение альтернативных и возобновляемых источников энергии, разработка и внедрение теплонасосных и комбинированных установок в системы тепло- и холода-снабжения объектов промышленного и гражданского строительства смогут значительно сократить потребление органического топлива.

Особенно перспективным представляется использование тепловых насосов в сочетании с системами на основе возобновляемых источников энергии ВИЭ [1,2]. Такие комбинированные системы теплоснабжения по степени взаимной интегрированности элементов теплонасосной системы и элементов систем на основе ВИЭ можно разделить на две категории:

1. Установки на основе сочетания ВИЭ с традиционными элементами теплонасосной установки ТНУ, в первую очередь для питания компрессора, как параллельно с сетью, так и самостоятельно (на основе стандартных выпускаемых промышленностью компонентов).

2. Установки с использованием нетрадиционных компонентов, интегрированных в комплексные устройства с элементами ВИЭ и ТНУ.

Ко второй категории можно отнести теплонасосные установки, имеющие в качестве низкопотенциального тепла геотермальные коллекторы и компрессоры, имеющие привод от вала двигателя дизель-генератора посредством клиноременных передач.

Методика эксперимента

В данной статье рассмотрена работа моноблочной тригенерационной экспериментальной установки, в состав которой входят два геотермальных тепловых насоса [3–5]. В качестве энергосилового агрегата применяется дизельный или газопоршневой (с искровым зажиганием) двигатель внутреннего сгорания (ДВС модели Kubota D905).

Химическая теплота топлива в двигателе частично преобразуется в механическую N_M , которая в виде вращающего момента передается непосредственно на вал асинхронного электрического генератора (ЭГ) и одновременно при помощи текстурной передачи на шкивы 2-х фреоновых компрессоров тепловых насосов ТН-1 и ТН-2 (фирмы производителя THERMO KING). Тепловые насосы ТН-1 и ТН-2 являются реверсируемыми и снабжены 4-х ходовыми клапанами, которые позволяют изменять функции теплообменников тепловых насосов (конденсатор (К) теплового насоса становится испарителем (И), и наоборот, соответственно изменяется направление теплового потока на противоположное).

Работа теплонасосных установок, как показано на рисунке 1, может быть организована на базе двигателя внутреннего сгорания. Двигатель работает частично или полностью на привод компрессоров ТНУ. Для этого в экспериментальной установке дополнительно смонтированы два компрессора с приводом от вала двигателя посредством клиноременных передач. Ведущий шкив передач установлен на валу электрогенератора по неподвижной посадке. Соеди-

нение валов двигателя и электрогенератора сохранено штатное. Ведущий шкив имеет два ручья под клиновой ремень. Ведомые шкивы, установленные

на валах компрессоров, одноручьевые и содержат электромагнитные муфты сцепления шкивов с валами компрессоров.

Рис. 1. Обобщенная техническая структура моноблочной тригенерационной установки (МТГУ):

ДВС – двигатель внутреннего сгорания, дизельный или газопоршневой;

ТО – теплообменник вода/вода системы охлаждения рубашки двигателя;

КУ – котел-утилизатор (газ/вода) тепла выхлопных газов;

ТН-1, ТН-2 – парокомпрессионные реверсируемые тепловые насосы

с непосредственным (текстронным) механическим приводом от ДВС;

К – конденсатор; И – испаритель; ЭГ – электрический генератор; ЭФ – фидер электропитания

Fig. 1. Generalized technical structure of monoblock trigeneration plant (MTGP):

ДВС - gas or gas-operated internal combustion engine;

ТО - water/water heat exchanger of engine jacket cooling system;

КУ - gas/water recovery boiler of exhaust heat;

ТН-1, ТН-2 - reversible vapor compression heat pumps with direct (Textron) mechanical drive from internal combustion engine;

К - condenser; И - evaporator; ЭГ - electric generator; ЭФ - feeder power

Включение муфт сцепления осуществляется с электронного пульта управления посредством компьютера. Таким образом, двигатель установки может работать только на электрогенератор. При этом будет вырабатываться электрическая энергия $N_{э} = 6,5$ кВт и тепловая энергия $Q_T = 40$ кВт в результате утилизации тепла выходных газов, тепла системы охлаждения двигателя и работы двух тепловых насосов в составе тригенерационной установки. Этот режим работы установки характеризуется как моногенерационный.

Двигатель может работать на электрогенератор и на один из компрессоров. В этом случае будет вырабатываться электрическая энергия $N_{э} = 3,5$ кВт, тепловая энергия за счет утилизации тепла выходных газов и системы охлаждения двигателя, а также в теплонасосной установке в количестве $Q_{тн} = 17,5$ кВт. В этом случае установка работает в режиме простой когенерации. Двигатель может работать на оба компрессора. В этом случае электрогенератор должен работать в холостом режиме, т. к. вся механическая энергия, вырабатываемая двигателем, будет расходоваться на привод компрессоров,

и будет вырабатываться только тепловая энергия, получаемая в теплонасосной установке и в результате утилизации тепла выходных газов и системы охлаждения двигателя. В этом случае установка работает в режиме сложной когенерации.

Таким образом, режим сложной когенерации (СКГ) с выработкой электрической и тепловой энергии осуществляется с включением геотермальных тепловых насосов. В качестве низкопотенциальных источников тепла для ТН использовалась водопроводная вода. Температура водопроводной воды поддерживалась близкой к значениям предполагаемых геотермальных источников тепла для сезонных условий г. Алматы с помощью холодильника, поскольку условия проведения экспериментов в исследовательской лаборатории учебного корпуса не позволяют монтаж геокolleкторов. В условиях реального объекта теплоснабжения от тепловых насосов предполагается монтаж геокolleкторов.

Установка производит электрическую энергию в необходимом количестве.

Образующаяся в ДВС теплота, за вычетом безвозвратных потерь, утилизируется в системе теплоснабжения тем же порядком, что и в простой когенерации.

В режиме СКГ предполагается, что количество механической энергии, отбираемой на генерацию электрической энергии, меньше максимальной мощности двигателя. Часть механической энергии затрачивается на привод компрессора теплового насоса (одного или двух при параллельной работе). Испаритель теплового насоса включен в гидравлический контур геокolleктора, конденсатор отдает тепло в систему теплоснабжения.

В частном случае электроэнергия не вырабатывается, а вся механическая энергия двигателя расходуеться только на привод компрессоров тепловых насосов.

Для приведения МГТУ в режим сложной когенерации осуществляются следующие операции:

- электромюфты тепловых насосов (одного или двух) включены;
- реверсивные клапаны тепловых насосов (одного или двух) включены в направлении отбора низкопотенциальной теплоты из геокolleктора и отдачи теплоты в систему теплоснабжения;
- теплообменники КУ, ТО и конденсатор теплового насоса включены в систему теплоснабжения;
- к шинам генератора (ЭГ) подключена электрическая нагрузка.

Теоретический анализ

На тригенерационной установке проведены экспериментальные исследования энергетических и экологических показателей МГТУ[5].

Целью исследований являлось экспериментальное определение составляющих энергобаланса прототипа установки и состава выхлопных газов при различных уровнях нагрузки, а также проверка работоспособности тепловых насосов в режиме производства тепловой энергии.

Исследуемые параметры необходимы для калибровки математических моделей и последующего анализа энергетической эффективности МГТУ, действующей в условиях реальной структуры энергопотребления. Такой анализ, в свою очередь, необходим для разработки обоснованного метода выбора энергооборудования и критериев оптимизации режимов работы.

В ходе экспериментов проводились измерения следующих параметров: расход топлива, расходы теплоносителей, температуры на входе/выходе ДВС, теплообменников и баков накопителей, выходного напряжения и тока.

Нагрузка на МГТУ производилась при помощи электрического котла (бойлера) с возможностью регулирования мощности (от 0 до 100 %).

Измерены расход топлива и теплоносителей в зависимости от времени проведения экспериментов. По измеренным данным расхода топлива построен график (в соответствии с рисунком 2), произведен расчет относительной энергетической эквивалентности топлива (при 100 % поступающей в дизельгенератор ДГ мощности).

Энергетический эквивалент топлива (100 % поступающей в ДГ мощности)

$$N_t = \frac{G_t \cdot Q_p}{3600}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где G_t – расход топлива за время Δt ; $G_{нн}$, $G_{нк}$ – показания расходомера топлива в начале и конце опыта:

$$G_t = \frac{G_{нн} - G_{нк}}{\Delta t}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (2)$$

Заданная длительность 1 опыта $\Delta t = 120$ с, часовой расход топлива $G_t^{час} = G_t \cdot 3600, \quad \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$

Рис. 2. Зависимость расхода топлива от нагрузки
Fig. 2. Dependence of fuel consumption on load

По данным показаний расходомеров топлива и счетчиков расхода теплоносителей были произведены расчеты тепловой энергии, полученной за счет утилизации теплоты выхлопных газов МТГУ. Теплота, переданная баку-аккумулятору от выхлопных газов в газо-водяном теплообменнике в результате снижения их температуры для каждого временного промежутка Δt ,

$$Q_{Gi}(t) = G_{Gi} \cdot C_{\text{г}} \cdot (t_{Gi}^{\text{вх}} - t_{Gi}^{\text{вых}}), \text{ кВт}, \quad (3)$$

где G_{Gi} – расходы газа на каждом временном участке, $t_{Gi}^{\text{вх}}$, $t_{Gi}^{\text{вых}}$ – температура газов на входе и выходе из газовой водяного теплообменника.

Тепловая энергия, отведенная в бак аккумулятор от рубашки охлаждения ДВС МТГУ,

$$Q_{\text{ГО}} = G^{\text{охл}} \cdot C_{\text{р}}^{\text{охл}} \cdot \Delta t^{\text{охл}}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где $G^{\text{охл}}$ – расход охлаждающей двигатель жидкости, $\Delta t^{\text{охл}}$ – разность температур охлаждающей жидкости на входе и выходе в двигатель.

Электрическая мощность трехцилиндрового дизель-генератора N_g рассчитана по формуле:

$$N_g = I_1 \cdot U_1 + I_2 \cdot U_2 + I_3 \cdot U_3, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Количество выработанного тепла на ТНУ рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{ТНУ}} = \beta \cdot N_m \cdot \phi \cdot 3600, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где N_m – механическая энергия, затраченная на привод вала дизель-генератора, а β – доля механической энергии, затрачиваемая на привод компрессора одного из двух ТНУ.

ϕ – коэффициент преобразования КОП ТНУ, который рассчитывается по формуле:

$$\phi = \frac{N_{\text{ТНУ}}^{\text{тепло}}}{\beta \cdot N_m}. \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

Расчет энергетических показателей МТГУ проведен согласно методике, изложенной в работе [5], результаты внесены в таблицу 1. По данным таблицы 1 построены графики на рисунке 5 в виде зависимостей энергетических показателей от нагрузки на ДВС.

Таблица 1

Данные по выработанной энергии

Table 1

Data generated power

Нагрузка %	Мощность топлива кВт	Электрическая мощность кВт	Тепловая энергия, полученная от рубашки ОЖ ДВС кВт	Тепловая энергия, полученная от котла утилизатора кВт	Затраты тепловой энергии на собственные нужды кВт	Потери тепловой энергии на радиацию и вибрацию кВт	Полезно использованная тепловая энергия кВт
0	5,67	0,00	3,02	1,17	0,88	0,56	4,22
25	8,39	1,46	3,91	1,52	0,88	0,57	6,94
50	10,91	2,92	4,31	2,05	0,88	0,70	9,33
75	14,17	4,48	5,05	2,85	0,88	0,82	12,47
100	22,31	5,87	9,73	4,72	0,88	0,97	20,46

Рис. 3. Зависимость тепловой энергии и мощности от нагрузки
Fig. 3. Dependence of thermal energy and power on load

Проведены экспериментальные исследования экологических показателей МТГУ. Химический анализ уходящих газов ДВС был произведен при помощи прибора TESTO 350 xl – газоанализатор с возможностью определения содержания O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , H_2 , а

также двух, трех и многоатомных газов, входящих в состав отработавших газов. Показания, снятые с газоанализатора, приведены в таблице 2, по данным таблицы были составлены графики (рисунок 4).

Состав выхлопных газов

Таблица 2

Composition of the exhaust gases

Table 2

Нагрузка	Содержание O_2 , %	Содержание CO_2 , %	Содержание CO , ppm	Содержание SO_2 , ppm	Содержание NO , ppm	Содержание NO_2 , ppm	Содержание NO_x , ppm	Содержание H_2 , ppm
0	17,1	2,8	219	7	144	51,8	197	27
25	15,62	3,92	137	5	261	34,2	297	24
50	13,14	5,75	82	7	384	22,6	407	18
75	11,1	7,34	107	9	399	22,4	378	16
100	5,14	11,7	424	0	401	10,7	413	51

Рис. 4. Зависимость состава выхлопных газов от нагрузки ДВС
Fig. 4. Dependence of the exhaust gases composition from the internal combustion engine load

Проведено исследование энергетических характеристик тепловых насосов в режиме работы МТГУ «сложная когенерация».

Испытание тригенератора по определению тепло- или холодопроизводительности ТН проведено одновременно двумя независимыми методами.

Результаты испытаний считались приемлемыми при условии, если они отличаются друг от друга не более чем на 4 %.

За действительное значение тепло- и холодопроизводительности принято среднеарифметическое результатов двух испытаний, проведенных разными методами.

Испытания проходили при установившемся тепловом режиме, при котором все рабочие параметры остаются неизменными или изменяются в допустимых пределах. Установившийся режим поддерживался в течение не менее 90 мин. Из них расчетный участок, на котором проводят измерение и запись параметров, должен быть продолжительностью не менее 60 мин.

Заключение

Значения коэффициента преобразования энергии для отдельного теплового насоса ТН-1 в составе МТГУ находятся в диапазоне величин $2,75 < \mu < 3,61$, что отвечает представлениям об эффективности тепловых насосов, реализованных на других объектах. При этом в отдельном эксперименте тепловая мощность ТН-1 составила $N_{\text{ТНУ}}^{\text{тепло}} = 7,07$ кВт, а потребляемая электрическая мощность ТН-1 $N_{\text{м}} = 2,4$ кВт. Средневзвешенное значение коэффициента преобразования теплового насоса близко к 3,5, что подтверждает энергетическую эффективность принятых теплонасосных технологий для ТН с механическим приводом от двигателя внутреннего сгорания МТГУ.

Полученные во время испытания МТГУ экспериментальные данные и расчет энергетических и экологических показателей установки подтверждают ее работоспособность в режиме работы «сложная когенерация». Компрессионные тепловые насосы ТН-1 и ТН-2 могут работать с приводом от теплового двигателя в режимах производства тепловой энергии и холода.

Список литературы

1. Мукажанов В.Н., Абилюдинова С.К., Васильченко Л.Ю. О перспективах применения тепловых насосов в рамках программы эффективного использования альтернативных источников энергии и возобновляемых ресурсов

Республики Казахстан // Вестник АИЭС. 2008. №3. С. 21–25.

2. Харченко В.В., Чемяков В.В. Автономные комбинированные системы теплоснабжения с использованием геотермальной энергии. Труды 8-ой специализированной выставки и научно-практического семинара «Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация ОПК». М., 2007. С. 108–111.

3. Дворников В.А., Стояк В. В. Пути решения энергетических проблем сельских населенных пунктов // Вестник АУЭС. 2012. № 4 (19). С. 4–9.

4. Дворников В.А., Стояк В.В., Тулебаев Ж.А. Место и роль децентрализованной энергетики в энергоснабжении Казахстана, пути её реализации с помощью гибридных энергогенерирующих установок // Вестник АУЭС. 2014. № 2 (25). С. 4–12.

5. Поданев И.Е., Стояк В.В. Эксплуатация и промышленные испытания теплотехнологических установок и систем. Методические указания к лабораторным работам для магистрантов всех форм обучения специальности 6М071700 Теплоэнергетика Алматы: АУЭС, Часть I. 2011. 40 с.

References

1. Mukazhanov V.N., Abildinova S.K., Vasil'chenko L.Y. O perspektivah primeneniâ teplovyh nasosov v ramkah programmy éffektivnogo ispol'zovaniâ al'ternativnyh istochnikov énergii i vozovnovlâemyh resursov Respubliki Kazahstan. *Vestnik AIES*, 2008, no. 3, pp. 21–25 (in Russ.).

2. Harchenko V.V., Chemekov V.V. Avtonomnye kombinirovannye sistemy teplosnabzheniâ s ispol'zovaniem geotermal'noj énergii. Trudy 8 specializirovannoy vystavki i naučno-praktičeskogo seminarâ «Izdeliâ tehnologi i dvojnogo naznačeniâ. Diversifikaciâ OPK». Moscow, 2007, pp. 108–111 (in Russ.).

3. Dvornikov V.A., Stoyak V. V. Puti rešeniâ énergetičeskikh problem sel'skih nase-lennyh punktov. *Vestnik AUÉS*, 2012, no. 4 (19), pp. 4–9 (in Russ.).

4. Dvornikov V.A., Stoyak V.V., Tulebaev Zh.A. Mesto i rol' decentralizovannoy énergetiki v énergosnabzhenii Kazahstana, puti eë realizacii s pomoš'û gibridnyh énerogeneriruûših ustanovok. *Vestnik AUÉS*, 2014, no. 2 (25), pp. 4–12 (in Russ.).

5. Podanев I.E., Stoyak V.V. Ékspluataciâ i promyšlennye ispytaniâ teplotehnologičeskikh ustanovok i sistem. Metodičeskie ukazaniâ k laboratornym rabotam dlâ magistrantov vseh form obučeniâ special'nosti 6M071700 Teploénergetika Almaty: AUÉS Publ., part I, 2011, 40 p (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995