



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-2-275-285

УДК 635.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА

И.К. Шаталов, И.И. Шаталова

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В настоящее время в тепличное хозяйство по всему миру активно внедряются инновационные технологии. Одним из способов повышения энергоэффективности тепличных комплексов является применение систем энергообеспечения теплиц, включающих тепловые насосы. Технология расчета и монтажа тепловых насосов хорошо отработана и широко используется в настоящее время для отопления жилых домов и других помещений. В работе проведен анализ эффективности применения теплового насоса, работающего совместно с тепловым двигателем для энергообеспечения теплицы. Был выбран газопоршневой двигатель фирмы «Звезда-энергетика» мощностью 315 кВт и тепловой насос мощностью 523 кВт фирмы Menenergy. Экономия энергоресурсов по сравнению с традиционной системой энергообеспечения теплицы: при использовании только теплового насоса 25%; при использовании газопоршневого ДВС с утилизацией тепла 32%; при совместной работе газопоршневого ДВС и ТН до 60%.

Ключевые слова: тепловой насос, теплица, газопоршневой двигатель, газовый котел

Затраты энергии на отопление — основные издержки в тепличном хозяйстве и напрямую влияют на конечную цену выращенного продукта. Именно поэтому необходимо уделять внимание энергоэффективности российских тепличных хозяйств. Необходимо вывести российскую продукцию на конкурентоспособный уровень, чтобы постепенно снизить долю ввозимых фруктов и овощей.

Наряду с традиционными системами энергообеспечения тепличных комплексов, все большее применение находят системы на базе инновационных технологий.

Одной из эффективных и экономичных установок для отопления теплиц служит тепловой насос (ТН). Он способен использовать низкопотенциальную тепловую энергию из различных ресурсов окружающей среды. ТН работает по закрытому контуру, и не выделяет вредных веществ в процессе эксплуатации. Наибольшее распространение получили парокомпрессорные ТН. Для отопления теплиц наиболее приемлемым вариантом является водяной тепловой насос замкнутого или открытого контура [1; 2].

Эффективность работы теплонасосной установки характеризуется отношением теплоты Q , полученной теплопотребителем, к потребленной ТН электрической мощности $N_{пр}$. Данную величину называют коэффициентом преобразования ТН:

$$\mu = \frac{Q}{N_{\text{пр}}}.$$

На рисунке 1 представлены схема ТН замкнутого контура для отопления помещений с использованием в качестве источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) теплоты грунта. Для отопления теплиц используются также ТН с погруженным в водоем теплообменником [3].

ТН используются по всему миру и уже успели показать себя в роли надежной и экономичной машины для обогрева помещений, в частности, для отопления теплиц.

В таблице 1 приведено сравнение затрат на покупку и эксплуатацию традиционных систем отопления и ТН [4].

Расчеты проведены на основе результатов эксплуатации двускатной теплицы с высотами конька 5 м и стены 4 м, площадью 5000 м². Теплица имела однослойное остекление из полиэтилена. Исследование проводилось в г. Сидней, Австралия. Анализ предполагал, что температура не падала ниже 18 °С и относительная влажность оставалась на уровне 75%. Проанализировав сведения (см. табл. 1), можно сделать вывод, что ТН, несмотря на большую стоимость покупки и установки, позволяет существенно экономить на эксплуатационных расходах [4].

Стоит уделить внимание пилотному проекту, описанному в статье журнала «Вестник» ВНИИ электрификации сельского хозяйства. В статье был представлен расчет автономного совместного энергообеспечения теплицы. В качестве источника тепла и электроэнергии использовалась мини-ТЭС с когенерацией тепловой энергии и применением тепловых насосов. В качестве целевого тепличного хозяйства было принято ЗАО «Совхоз имени М. Горького». Проведя расчеты, авторы приходят к выводу, что модернизация теплового оборудования с применением ТН позволит снизить расход топлива и выбросы СО₂ в атмосферу в 3,3 раза; уменьшить энергоемкость тепличной овощной продукции в 3,3 раза.

К недостаткам и трудностям применения ТН относятся несколько факторов. Один из таких факторов — отсутствие подходящих рабочих агентов, которые, с одной стороны, удовлетворяли бы экологическим требованиям (Киотское и Монреальское соглашения), а с другой стороны, обладали высокими термодинамическими свойствами. Второй фактор связан с низкими температурами теплоносителя на выходе из ТН, недостаточными для непосредственного применения в промышленных целях и в целях теплоснабжения. В первом случае ведутся исследования по созданию новых альтернативных рабочих агентов. Вторая проблема может быть решена за счет применения ТН с другими дополнительными источниками для производства теплоты, например, тепловыми двигателями с утилизацией их вторичных ресурсов.

В данной работе рассматриваются различные схемы энергообеспечения тепличного комплекса, включая тепловой насос и тепловой двигатель.

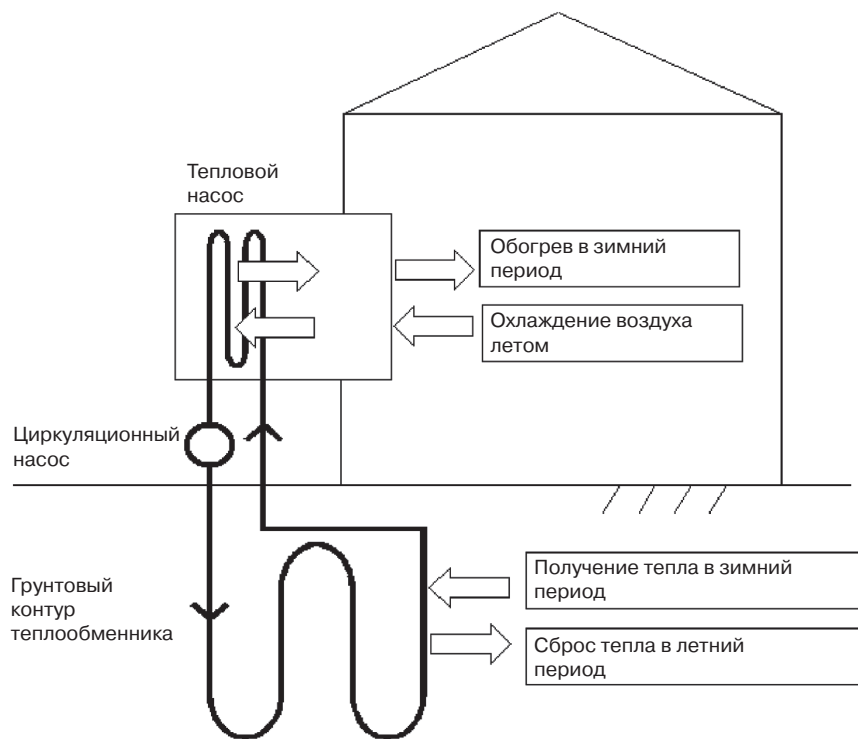
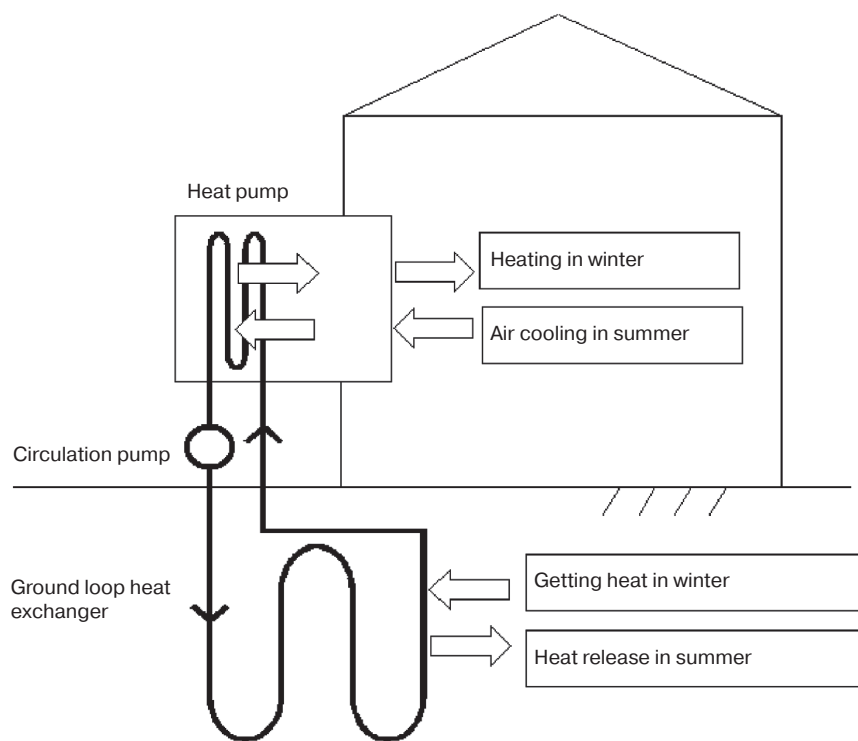


Рис. 1. Простейшая схема ТН, ИНТ-грунт



[Fig. 1. A simple diagram of a heat pump, low- potential heat source — ground]

Таблица 1

Сравнение затрат на покупку и эксплуатацию оборудования для обогрева теплицы с помощью традиционных систем отопления и системы с тепловым насосом, тыс. долл. США
[Comparison of costs for purchase and maintenance of equipment for heating of greenhouses with conventional heating systems and systems with a heat pump thousands of dollars]

Тип отопительной системы и вид топлива Type of heating system and type of fuel	Затраты на покупку и установку комплекта оборудования Costs for the purchase and installation of the equipment	Стоимость эксплуатации за 10 лет Operating cost for 10 years	Средне-годовая стоимость эксплуатации (за 10 лет) Average annual operating cost (for 10 years)	Стоимость эксплуатации за 15 лет Operating cost for 15 years	Средне-годовая стоимость эксплуатации (за 15 лет) Average annual operating cost (for 15 years)
Котел с жидким теплоносителем (природный газ) Boiler with heat transfer fluid (natural gas)	205	2200	212	3200	213
Котел с жидким теплоносителем (сжиженный газ) Boiler with liquid coolant (liquefied gas)	205	2273	220	3222	220
Тепловой насос с грунтовым теплообменником (эл.энергия) Heat pump with ground heat exchanger (el. energy)	400	1151	81	1412	94
Электрокотел (эл.энергия) Heat pump with ground heat exchanger (el. energy)	75	3313	301	4446	296

Сравнительный расчет различных отопительных систем теплиц

Исходные данные для расчета. Площадь теплицы — 10000 м² или 1 га; расход энергии на искусственную инсоляцию составляет 20% от всей энергии, расходуемой на выращивание культуры. Именно такой процент энергии в среднем затрачивается на стимуляцию роста растений с помощью искусственного освещения, в течение всего года [5]. Потребность растений в тепле зависит от времени года. Расход энергии на обогрев находится в рамках между 15 и 50 (70) Вт/м² [6]. Для расчета примем, что потребность в тепловой энергии составляет 50 Вт/м².

Чтобы провести достоверное сравнение различных типов энергообеспечения теплиц, за основу примем часовой расход условного топлива (у.т.), сжигаемого для получения того или иного количества энергии. Таким образом, можно отказаться от сравнения эффективности оборудования посредством сравнения стоимости эксплуатации, так как стоимость топлива, тепловой и электрической энергии являются динамическими, постоянно меняющимися величинами. В России за единицу условного топлива принята величина, равная 293 000 КДж/кг (за рубежом в качестве единицы условного топлива используется нефтяной эквивалент — 10 000 ккал/кг).

Таким образом, необходимая тепловая мощность на отопление

$$N_T = 50 \cdot 10\,000 = 500\,000 \text{ Вт} = 500 \text{ кВт.}$$

Электрическая мощность на досвечивание

$$N_{\text{Э}} = N_T \cdot 20\% = 500 \text{ кВт} \cdot 20\% = 100 \text{ кВт.}$$

Суммарная мощность

$$N_{\Sigma} = N_T + N_{\text{Э}} = 500 \text{ кВт} + 100 \text{ кВт} = 600 \text{ кВт.}$$

Вариант 1. Энергообеспечение теплицы с газовым котлом: тепловая мощность 500 кВт; топливо-природный газ, $Q_H^p = 30\,000$ КДж/кг; КПД газового котла 88%; электрическая мощность 100 кВт.

Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га в течение самого холодного времени года, равен 104,8 кг-у.т./ч.

Вариант 2. Энергообеспечение теплицы от ТН: тепловая мощность 500 кВт; электрическая мощность 100 кВт (рис. 2).

Проведен расчет ТН с грунтовым теплообменником. Принимаем, что теплообменник заложен на глубине 5 м. Грунт на глубине более 5 м характеризуется невысокой (8—12 °С), но постоянной температурой, что позволяет рассматривать его как эффективный источник энергии для тепловых насосов.

Исходные данные для расчета: тепловая производительность ТН — $Q = 500$ кВт; тип рабочего агента — R134a. Расчетом получено, что коэффициент преобразования теплового насоса равен 4,2. Это означает, что для выработки необходимой тепловой мощности в 500 кВт, тепловой насос затрачивает 119 кВт электроэнергии. Так как мы приняли, что электроэнергия, необходимая для освещения рас-

тений в теплице равна 100 кВт, суммарная необходимая электрическая мощность для энергообеспечения теплицы

$$N_{\Sigma} = N_{\text{ТНУ}} + N_{\text{Э}} = 119 + 100 = 219 \text{ кВт.}$$

Затраты на энергообеспечение в расходе условного топлива (обогрев и досвечивание) составляют 69,9 кг.у.т./ч.

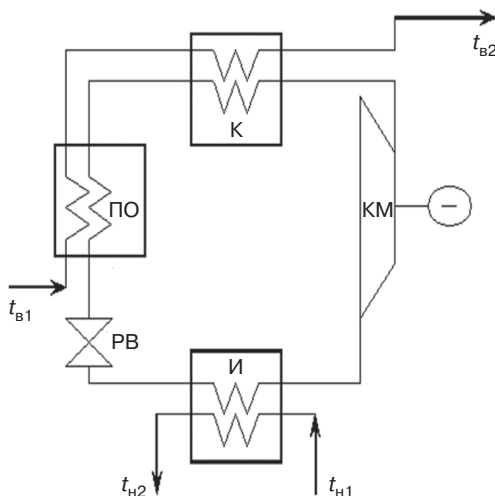


Рис. 2. Схема работы парокompрессионного ТН: КМ — компрессор; К — конденсатор; ПО — переохладитель; РВ — регулирующий вентиль; И — испаритель; t_{b1} — температура греющей воды на входе в ТН; t_{b2} — температура греющей воды на выходе из ТН, на входе в теплицу

[Fig. 2. The scheme of the steam compression heat pump: КМ — compressor; К — condenser; ПО — subcooler; РВ — control valve; И — vaporizer; t_{b1} — the temperature of heating inlet water for the heat pump; t_{b2} — the temperature of the heating water at the outlet of the heat pump, at the entrance to the greenhouse]

Исходя из потребной тепловой мощности выбран тепловой насос Menergy (Канада) (рис. 3).



Рис. 3. Промышленный тепловой насос Menergy
[Fig. 3. Industrial Heat Pump Menergy]

Вариант 3. Энергообеспечение теплицы от ДВС.

Выбран в качестве энергетической установки газопоршневой двигатель внутреннего сгорания QSK 19G фирмы «Звезда — Энергетика», на номинальном режиме работы: электрическая мощность 315 кВт, тепловая мощность 411 кВт, КПД 35,8%.

Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га равен 70,8 кг·у.т./ч.

Вариант 4. Энергообеспечение теплицы от ДВС с ТН.

Схема использования теплоты, вырабатываемой газовым двигателем с искровым зажиганием, связанным с компрессором ТН, приведена на рис. 4 [7]. Часовой расход топлива, необходимый для энергообеспечения теплицы площадью 1 га в течение самого холодного времени года равен 41,9 кг·у.т./ч.

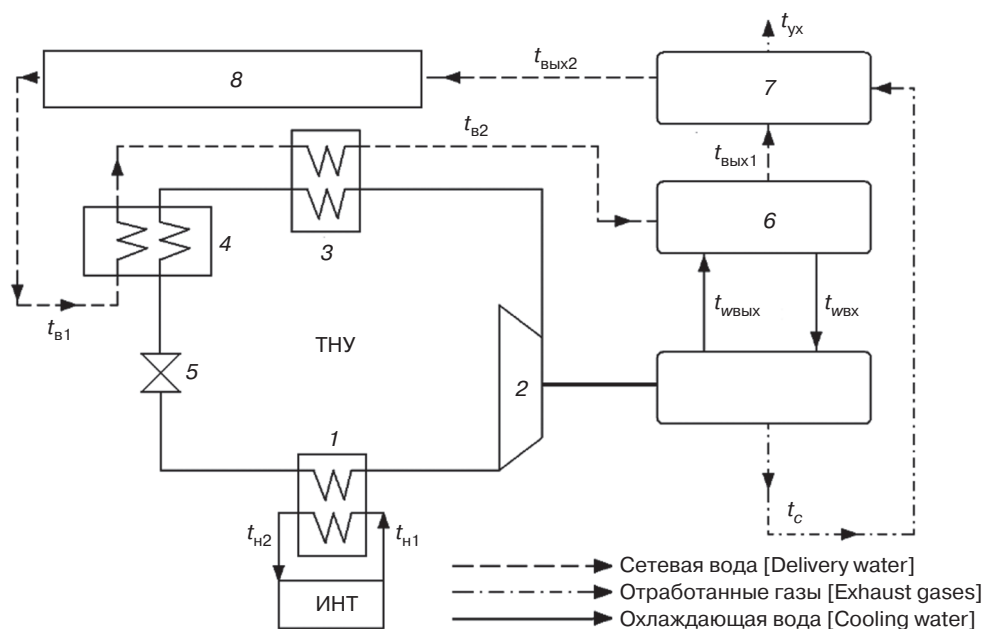


Рис. 4. Схема использования теплоты в теплонасосной установке с газовым двигателем с искровым зажиганием: 1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — конденсатор; 4 — переохладитель; 5 — регулирующий вентиль; 6 — теплообменник системы охлаждения двигателя; 7 — теплообменник утилизации теплоты ОГ; 8 — теплотребитель, отопление, теплица; ГД — газовый двигатель

[Fig. 4. Scheme of using heat in a heat pump with gas engine with spark ignition: 1 — vaporizer; 2 — compressor; 3 — condenser; 4 — subcooler; 5 — control valve; 6 — heat exchanger of the engine cooling system; 7 — heat exchanger utilizing the heat; 8 — heat consumer, heating, greenhouse; ГД — gas engine]

Из приведенных данных разных вариантов энергообеспечения теплицы (табл. 2) следует, что система энергообеспечения теплицы тепловым насосом в сочетании с тепловым двигателем — самая экономичная (до 60% экономии топлива, по сравнению с газовым котлом).

Таблица 2

Сравнение разных вариантов энергообеспечения теплицы
[Comparison of different energy supply options for the greenhouse]

Тип отопительной системы и вид топлива Type of heating system and type of fuel	Потребности в электрической мощности, кВт Needs for electrical power, kW	Часовой расход условного топлива на обогрев, кг·у.т./ч Consumption of conventional fuel for heating per hour, kg.c.f./h	Часовой расход условного топлива на досвечивание, кг·у.т./ч Consumption of conditional fuel for supplementary lighting per hour, kg.c.f./h	Общий часовой расход условного топлива, кг·у.т./ч The total hourly fuel consumption, kg.c.f./h	Относительный часовой расход условного топлива The relative hourly flow rate of conventional fuel
Газовый котел (природный газ) Gas boiler (natural gas)	100	69,8	35,1	104,8	1,0
Тепловой насос замкнутого контура с грунтовым теплообменником (электро-энергия) Closed-loop heat pump with ground heat exchanger (electricity)	219	41,7	35,1	76,8	0,73
Тепловой двигатель (природный газ) Heat engine (natural gas)	100	35,6	35,1	70,7	0,68
Тепловой двигатель (природный газ) + тепловой насос Heat engine (natural gas) + heat pump	219	6,8	35,1	41,9	0,4

Выводы

1. Традиционная система энергоснабжения теплицы имеет простую тепловую схему, хорошую ремонтпригодность, проста в эксплуатации, тем не менее, ее главный недостаток — малая экономичность.

2. Тепловые насосы дают большие возможности по сбережению энергии на отопление теплиц. Технология расчета и монтажа тепловых насосов хорошо отработана и широко используется в настоящее время для отопления жилых домов и других помещений.

3. Экономия энергоресурсов по сравнению с традиционной системой энергообеспечения (газовый котел) теплицы составляет: при использовании только ТН — 27%; при использовании только газопоршневого ДВС с утилизацией тепла — 32%. При совместной работе газопоршневого ДВС и ТН — 60%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Andrew D. Chiasson* Geothermal heatpump and heatengine systems. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 473 p.
- [2] *Ruqun Wu*. Energy Efficiency Technologies — Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump // *Journal of sustainable development*. 2009. Vol. 2. No. 2. Pp. 14–17.
- [3] *John W., Bartok Jr.* Geothermal Heat for Greenhouses, Natural Resources Mgt. & Engr. Dept. University of Connecticut, Storrs CT, 2008. Pp. 2–5.
- [4] *Badgery-Parker Jeremy*. Ground Source Heat... as an option for greenhouses // *Practical Hydroponics & Greenhouses*. October 2013. Issue 136. URL: <http://www.hydroponics.com.au/ground-source-heat-as-an-option-for-greenhouses/> (дата обращения: 05.02.2017).
- [5] *Свенцицкий И.И., Алзахова Е.О., Обычный А.Н.* Энергоемкость, КПД тепловых преобразователей энергии и эксергический анализ. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. С. 166–187.
- [6] *Круг Гельмут*. Овощеводство / пер. с нем. В.И. Леунова. М.: Колос, 2000. 572 с.
- [7] *Шаталов И.К.* Теплонасосные установки с приводом от тепловых двигателей: учеб. пособие. М.: РУДН, 2009. 94 с.

© Шаталов И.К., Шаталова И.И., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 5 марта 2017

Дата принятия к печати: 16 марта 2017

Для цитирования:

Шаталов И.К., Шаталова И.И. Оценка эффективности применения инновационных технологий для энергообеспечения тепличного комплекса // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 2. С. 275–285.

Сведения об авторах:

Шаталов Иван Касьянович, кандидат технических наук, профессор Департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Сфера научных интересов*: энергетическое машиностроение, КПД турбин, мощность газотурбинных установок, тепловые насосы, компрессорные станции, экономичность газотурбинных установок, газоперекачивающих станций. *Контактная информация*: e-mail: shatalov_ik@rudn.university

Шаталова Ирина Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Департамента инженерного бизнеса и менеджмента инженерной академии Российского университета

дружбы народов. *Сфера научных интересов:* система контроллинга, управленческий учет, человеческие ресурсы, менеджмент, экономическая эффективность в энергетике. *Контактная информация:* e-mail: shatalova_ii@rudn.university

THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR ENERGY SUPPLY OF GREENHOUSES

I.K. Shatalov, I.I. Shatalova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Greenhouse industry around the world is actively introducing innovative technology. The suggested way to improve the cost efficiency of greenhouses is to use power supply systems, including heat pumps. The technology of installation and its calculations of heat pumps is well determined at present and widely used for heating houses and other premises. The paper presents the analysis of application of heat pump, working in conjunction with a heat engine for energy supply of greenhouses. We selected gas-piston engine capacity 315 kW of the company “Zvezda-Energetika” and the heat pump capacity of 523 kW of the company “Menergy” in our study. The results are: energy savings compared with traditional energy supply system of the greenhouse if using only the heat pump is 25%; if using a gas engine with heat recovery is 32%; when combined gas engine and TNU to 60%.

Key words: heat pump, greenhouse, gas-piston engine, gas boiler

REFERENCES

- [1] Andrew D. Chiasson *Geothermal heatpump and heatengine systems*. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 473 p.
- [2] Ruqun Wu. Energy Efficiency Technologies — Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. *Journal of sustainable development*. 2009. 2(2): 14–17.
- [3] John W., Bartok Jr. *Geothermal Heat for Greenhouses*, Natural Resources Mgt. & Engr. Dept. University of Connecticut, Storrs CT, 2008:2–5.
- [4] Badgery-Parker Jeremy. Ground Source Heat as an option for greenhouses. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, October 2013. Issue 136. Available from: <http://www.hydroponics.com.au/ground-source-heat-as-an-option-for-greenhouses> [cited 2017 Feb 5].
- [5] Sventitsky I.I., Alshahafa E.O., Obynochny A.N. *Energy capacity, efficiency of thermal energy converters and analysis of exergy*. M.: GNU VIESH, 2009. P. 166–187. (In Russ).
- [6] Krug Helmut. *Vegetable Production: Translation from German Leunov V.I.* M.: KOLOS, 2000. 572 p. (In Russ).
- [7] Shatalov I.K. *Heat pumps driven by heat engines: textbook*. M.: RUDN University, 2009. 94 p. (In Russ).

Article history:

Received: 5 March 2017

Accepted: 16 March 2017

For citation:

Shatalov I.K., Shatalova I.I. (2017) The effectiveness of innovative technologies for energy supply of greenhouses. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(2), 275–285.

Bio Note:

Ivan K. Shatalov, Ph.D., Professor of the Department of mechanical engineering and instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: power engineering, turbine efficiency, capacity of gas turbine plants, heat pumps, compressor stations, efficiency of gas turbines and gas compressor stations. *Contact information*: e-mail: shatalov_ik@rudn.university

Irina I. Shatalova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Engineering Business and Management, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: Controlling system, management accounting, human resources, management, economic efficiency in the energy sector. *Contact information*: e-mail: shatalova_ii@rudn.university