

УДК 620.98

АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА МЕСТНЫХ ВИДАХ ГОРЮЧИХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ, БАЗИРУЮЩИЕСЯ НА АДАПТИВНОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ И СИСТЕМЕ БЕЗНАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Велицко В.В., Прохоров А.И.

ООО «ОЦР Технологии», г. Москва, Российская Инженерная академия, г. Москва

Аннотация

В материале показана возможность создания автономных энергоустановок (мини-ТЭЦ), использующих местные виды топлив и возобновляемые источники энергии (ВИЭ), работающих по адаптивному термодинамическому циклу, позволяющему максимально полно использовать располагаемый переменный теплоперепад между источником тепла и внешней средой, зависящий как от условий подвода тепла, так и от переменных климатических условий. Указана возможность циркуляции рабочего тела (РТ) в конуре энергоустановки без использования классических насосов или компрессоров для обеспечения его циркуляции.

В настоящее время приоритетной задачей является обеспечение энергоснабжения жизнедеятельности с, по возможности, максимальным использованием ВИЭ, в том числе таких, как солнечная и геотермальная энергия. Вторым направлением развития мини-ТЭЦ является задействование для нужд энергоснабжения местных, в том числе возобновляемых видов горючих (топлив) [1, 2], что позволит как максимально сократить плечо транспортировки горючего к месту потребления, так и сократить дополнительную эмиссию диоксида углерода в атмосферу. Примером концепции такой комбинированной мини-ТЭЦ, использующей совместно ВИЭ и местные виды горючих является мини-ТЭЦ по технологии «Heat-El», базирующаяся на модифицированном цикле Ренкина с органическим РТ, разработанная ООО «ОЦР-Технологии» (рис. 1)

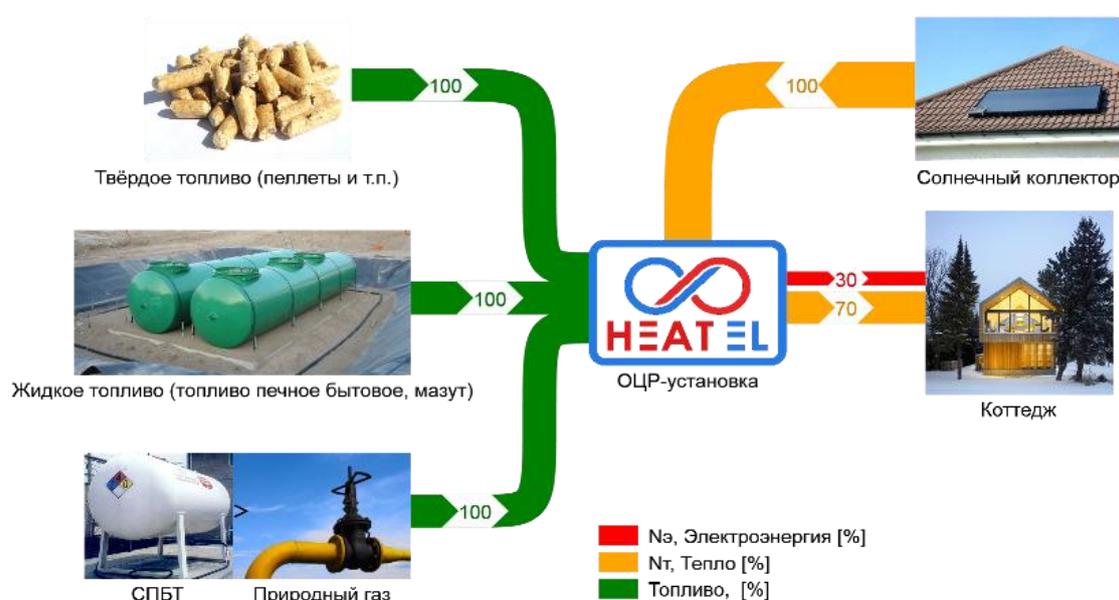


Рис. 1. Комбинированная мини-ТЭЦ, использующая ископаемые горючие и ВИЭ.

Аналогично комбинированному использованию ВИЭ и органических, в том числе невозобновляемых горючих, в настоящее время рассматриваются и ОЦР-установки, использующие исключительно солнечную энергию для производства электроэнергии и тепла (рис. 2).

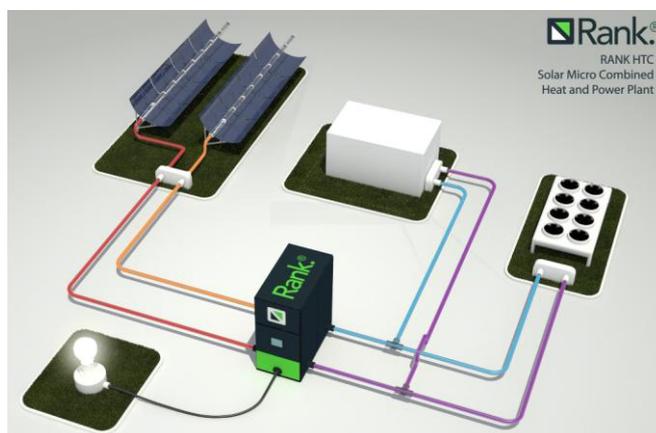


Рис. 2. Теплофикационная ОЦР-установка [2].

Ключевым требованием при разработке ОЦР-установки (рис. 1) являлась возможность выработки электроэнергии с использованием местных видов горючих и ВИЭ с себестоимостью не выше отпускной цены энергии, реализуемой потребителям посредством централизованных электрических сетей. Это должно позволить обеспечивать конкурентоспособное электроснабжение в районах с отсутствующими электрическими сетями или с дефицитом электрической мощности, а также обеспечить конкурентоспособное энергоснабжение потребителей в районах, куда осуществляется, периодически срываеваемый, северный завоз [3]. При этом в районах, с наличием централизованного электроснабжения, данная технология также может быть применима, т.к. в настоящее время на постсоветском пространстве и в частности – в России, наблюдается рост системных аварий в электрических сетях, вплоть до блэкаутов [4]. Это позволит экономически эффективно вырабатывать электроэнергию, используя внешние электрические сети в качестве резервного источника энергии на период проведения на ОЦР-установке планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Ключевыми техническими аспектами, которые должны обеспечить высокую экономичность установки по технологии «Heat-El» являются:

- применение адаптивного термодинамического цикла, обеспечивающего максимально полное использование располагаемого эксергетического потенциала, меняющегося в основном при изменении температуры окружающей среды;
- использование бесклапанных регулируемых насоса и детандера, позволяющих варьировать степень повышения давления рабочего тела и степень его расширения;
- использование в качестве РТ планово-деградирующего вещества или смеси веществ, например, сжиженного пропан-бутана технического (СПБТ), что позволяет при высокотемпературном подводе тепла обеспечивать высокий электрический коэффициент полезного действия (КПД) ОЦР-установки, планомерно замещая незначительную часть РТ подвергшуюся термолузу;
- снижение энергозатрат на привод насоса путём применения технологии бескомпрессионного нагнетания рабочего тела, что особенно в ОЦР-установках, с низкой теплоёмкостью РТ, позволяет значительно повысить электрический КПД (КПДэ) и существенно снизить как допустимый утилизируемый температурный перепад, так и нижнюю границу экономически эффективно утилизируемого тепла.

качестве базового условия учитывается требование работы энергоустановки при минимальной допустимой температуре в подогревателе (E-100). Это означает, что при использовании более качественных видов топлив и более интенсивной солнечной радиации в достаточной мере не используется увеличивающийся эксергетический потенциал между подогревателем и охладителем, т.к. РТ подаётся в подогреватель (E-100) с давлением меньшим, чем оптимальное давление при фактически достижимой температуре подогрева.

Аналогичная ситуация складывается и при снижении температуры окружающего воздуха. При отсутствии необходимости полного использования вырабатываемой тепловой энергии на нужды теплофикации, тепловая энергия полностью или частично отводится во внешнюю среду с использованием холодильника, например, градирни (АС-100). Ключевым требованием для энергоустановки, использующей РТ в жидкой фазе, является полная конденсация РТ в холодильнике. При отсутствии конденсации РТ в холодильнике, РТ будет поступать на всас нагнетателя (P-100) в виде, как минимум двухфазной среды, что может привести к неработоспособности нагнетателя, а также приведёт к увеличению его потребляемой мощности, затрачиваемой на компримирование паровой или газовой фазы РТ.

В этой связи термобарические условия полной конденсации РТ в градирне (АС-100) определяются самым жарким периодом года. Учитывая что среднегодовая температура на 20 – 30 С и более ниже максимальной годовой температуры, существующие энергоустановки и здесь работают с заниженным КПД, что обусловлено не полным использованием располагаемого эксергетического потенциала между фактическими температурами подвода тепла к РТ в подогревателе и отвода от него тепла в холодильнике.

Данная задача может быть успешно решена с использованием разработанного адаптивного термодинамического цикла, позволяющего в реальном времени отслеживать температуру подвода тепла к РТ в подогревателе и температуру отвода тепла от РТ в охладителе и в зависимости от них изменять степень повышения давления нагнетателя (P-100) и степень расширения РТ в детандере (K-100). Это позволяет максимально полно использовать располагаемый эксергетический потенциал и увеличить среднегодовую выработку электроэнергии. Например, для двухконтурной ОЦР-установки (рис. 4), первый контур которой заполнен аммиаком, а второй – изопентаном (оба рабочих тела являются рекомендованными к применению природными хладагентами), максимальный КПД составит 39%, среднегодовой, в зависимости от климатической зоны, – 35 – 36%, тогда как без применения адаптивного цикла КПД составит 32% [5].

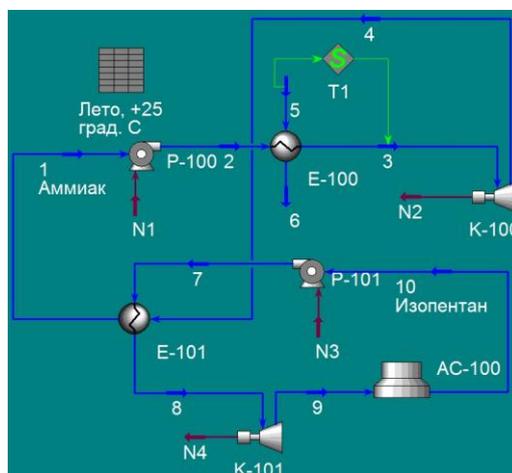


Рис. 4. Двухконтурная ОЦР-установка [5].

На основе созданного адаптивного ОЦР-цикла разработана проектная документация на ОЦР-установку для энергоснабжения коттеджей (рис. 5).



Рис. 5. Двухконтурная ОЦР-установка «Heat-El Micro» электрической мощностью 10 кВт, тепловая мощность 15 кВт.

На базе ОЦР-установки по Рис. 5 ООО «ОЦР Технологии» совместно с ООО «МАЭН» разработана схема подключения ОЦР-установок, являющихся блочными теплоутилизационными энергетическими комплексами (БУТЭК), предназначенными для энергоснабжения промышленных потребителей, в частности – газоперекачивающих агрегатов (ГПА). БУТЭК и схема его включения в состав ГПА представлены на Рис. 6.

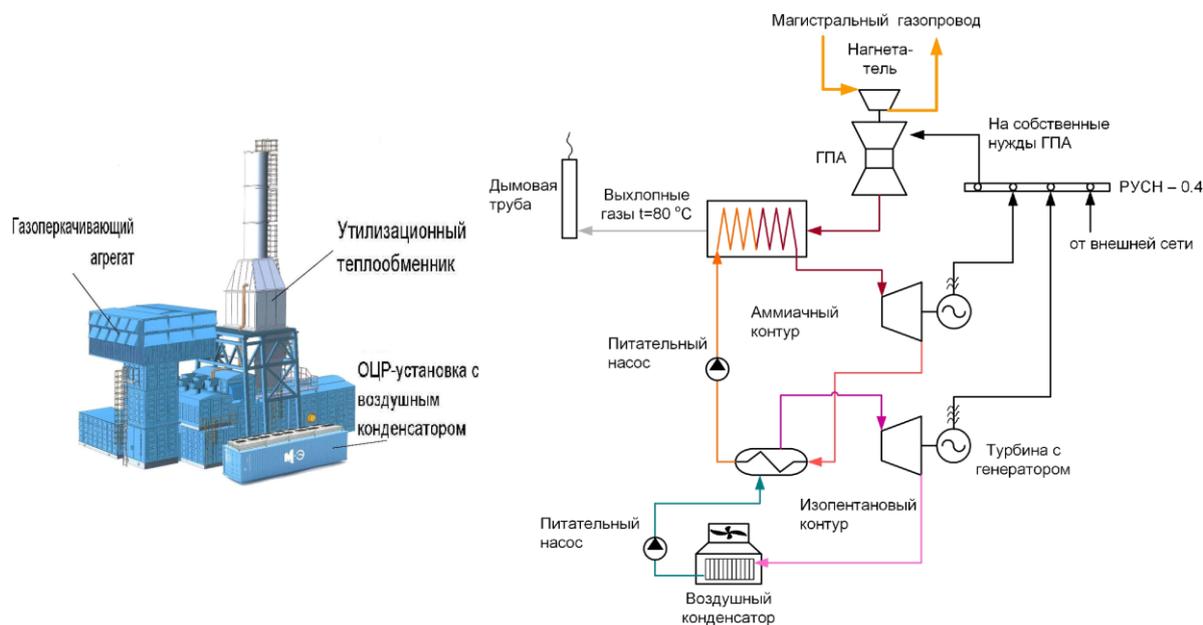


Рис. 6. БУТЭК на базе ОЦР-установки, предназначенный для обеспечения собственных нужд (СН) линейного ГПА.

Одной из сфер применения ОЦР-установок, использующих в своей работе адаптивный цикл является работа в составе водогрейных котельных, центральных и индивидуальных тепловых пунктов (ЦТП и ИТП). Особенностью функционирования системы теплоснабжения в России является количественное и качественное регулирование отпуска тепла. Если количественное регулирование при фиксированной температуре теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах теплотрассы не

представляет сложности для работы ОЦР-установки, то качественное регулирование определяется тепловым графиком, по которому существенно изменяется температура как минимум в подающем трубопроводе теплотрассы. При этом величина изменений температуры такова, что ОЦР-установка нерегулируемого типа, не всегда будет работоспособна. Пример встраивания ОЦР-установки в состав ЦТП показан на рис. 7.

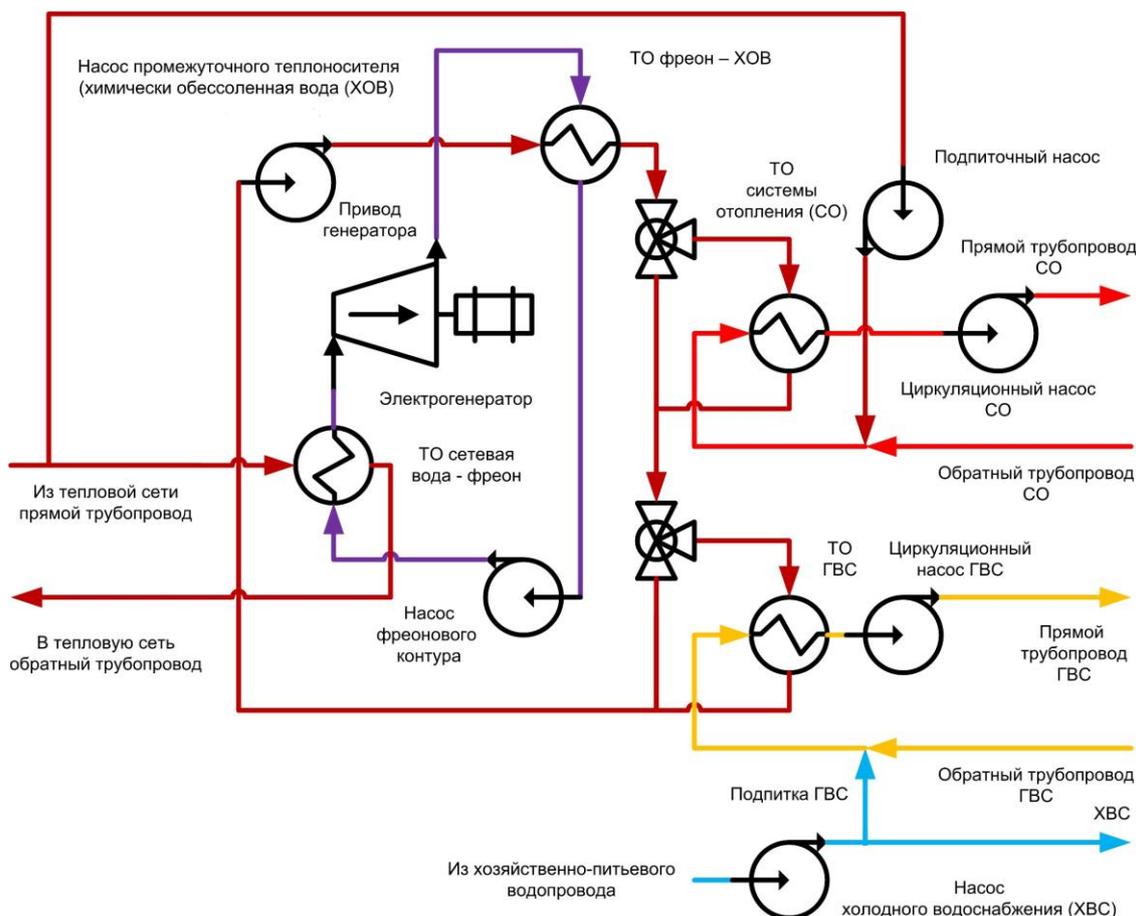


Рис. 7. Схема включение ОЦР-установки в состав ЦТП [7].

Применение данных решений позволит повысить надёжность функционирования системы энергоснабжения России и повысить энергетическую безопасность, снизить выбросы вредных веществ при неэффективном производстве электроэнергии (только для г. Москвы снижение выбросов NOx составит не менее 250 тонн в год) и повысит инфраструктурную безопасность населённых пунктов, которая, в настоящее время, имеет крайне низкую степень защиты [6].

В основу ОЦР-установок положены бесклапанные объёмные детандеры и насосы, обеспечивающие возможность регулирования рабочих фаз (впуск, нагнетание или сжатие, расширение) [5, 8].

Важной ключевой технологией, позволяющей создавать высокоэффективные локальные энергоустановки, использующие некавалифицированные горючие и ВИЭ является технология применения плано-деградирующего, в процессе эксплуатации энергоустановки, РТ [7]. Это связано с необходимостью использовать максимально высокую начальную температуру подвода тепла, тогда как применение высокостабильных РТ зачастую ограничивается либо их высокой стоимостью, либо – опасностью, либо – сложностью применения, обусловленной их агрессивностью и/или высокими рабочими давлениями (аммиак, диоксид углерода и т.п.). Например, применяемые органических РТ в простом цикле при начальной температуре (НТ) до +300 °С обеспечивают КПД не более 29% (см. Рис. 8).

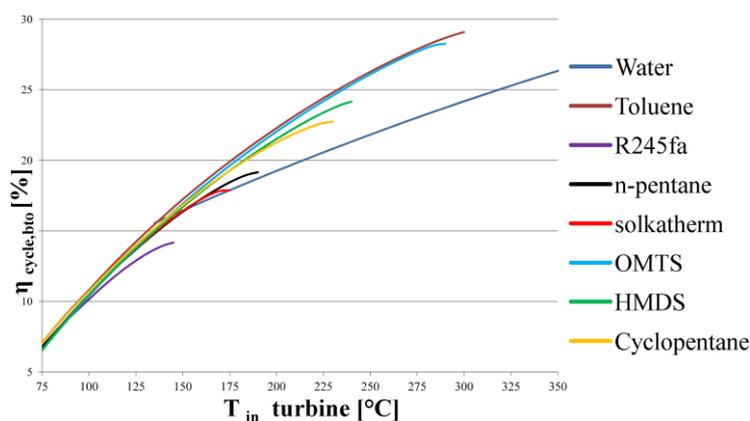


Рис. 8. Значения максимального КПДэ ОЦР с регенеративными ТО в зависимости от применяемого РТ [9].

Интенсивное разложение наблюдается у углеводородов, таких как $C_3 - C_6$, которые могли бы, исходя из своих теплофизических характеристик, применяться в качестве высокотемпературных РТ, т.к. дегидрирование алканов интенсифицируется, например, на хромосодержащих и никельсодержащих катализаторах, а это означает, что прекрасным катализатором для разложения РТ будет являться трубопроводный контур, выполненный из жаропрочных хромоникелевых сплавов.

Применение плано-деградирующего РТ позволяет обойти данное ограничение тем, что РТ вырабатывается непосредственно в энергоустановке из компонента горючего (например, пропан или бутан, получаемые из СПБТ), дешево, доступно и, после разложения, утилизируется в качестве компонента горючего при работе энергоустановки. Это позволяет существенно, как минимум до $+500...550\text{ }^{\circ}\text{C}$ поднять температуру подвода тепла к РТ в подогревателе, а при реализации дополнительных мероприятий ещё более поднять данную температуру. В результате реальная ОЦР-установка, в конденсационном режиме может обеспечивать КПДэ на уровне 45%, а в теплофикационном – на уровне 38...40%.

Значительную сложность при повышении КПДэ ОЦР-установок представляет из себя относительно низкая (в сравнении с водой) теплоёмкость используемых РТ (Рис. 9). Это приводит к тому, что, при аналогичных условиях подвода и отвода тепла для производства того же количества работы, как и в паросиловой установке, работающей по классическому циклу Ренкина, в ОЦР приходится прокачивать гораздо большее количество РТ. В результате, затраты энергии на работу нагнетателя в ОЦР-установке с единиц процентов (цикл Ренкина) возрастают до десятков процентов (ОЦР).

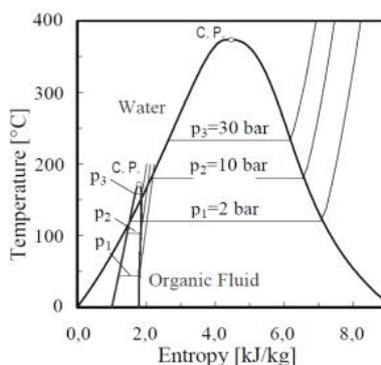


Рис. 9. T-S диаграмма для органического РТ и воды [10].

Эта задача может быть решена применением технологии безкомпрессионного нагнетания РТ, позволяющей на десятки процентов, вплоть до более, чем 50% снизить работу, потребную для привода нагнетателя РТ ОЦР-установки. Данное решение является компонентом разработанного нового термодинамического цикла [4, 11-14], в настоящее время являющегося ноу-хау разработчика, позволяющего экономически эффективно использовать как сверхмалые перепады температур (в десятки градусов Цельсия), так и уменьшить нижний порог утилизируемых температур менее +70 °С.

Выводы

С применением вышеописанного комплекса технологий имеется возможность создать высокоэффективные энергоустановки, работающие как с использованием ВИЭ, так и с использованием местных видов горючих, а также квалифицированных горючих (ископаемый природный газ, СПБТ, мазут и т.п.). Все вышеуказанные технологии могут реализовываться и по отдельности, однако совместно они позволяют получить синергетический эффект в виде технологии создания мини-ТЭЦ, работающих с использованием солнечной, геотермальной энергий, низкосортных местных топлив (сланцы, торф, биомасса и т.п.), обеспечивающей КПДэ на уровне не менее 50%.

Этот подход позволит обеспечить создание комфортных условий жизни и работы населения в зонах современного северного завода, Дальнего востока, а также в районах крайнего севера, обеспечив стабильное энергоснабжение не зависящее от условий навигации, а также осуществлять разработку, обогащение и переработку неиспользуемых минерально-сырьевых ресурсов, использование которых в настоящее время ограничивается сложностью логистики энергоносителей. В более широком смысле предлагаемая технология может являться одним из ключевых элементов ввода в активный оборот неиспользуемых территорий России, активизации на них хозяйственной деятельности, оживления сельского хозяйства в депрессивных регионах и обеспечение ввода под коттеджное строительство территорий, не имеющих энергетической инфраструктуры.

Дополнительным эффектом будет являться создание новых рабочих мест в промышленности, т.к. потенциальный спрос на микро-ТЭЦ бюджетного уровня в ближайшие годы может составить десятки тысяч штук в год, а также, с использованием мультипликативного эффекта, создание новых рабочих мест в смежных хозяйственных отраслях.

Литература

1. Кукушкин С.А., Велицко В.В., Краснов А.Г. Организация производства концентраторных солнечных электростанций, комбинированных с паросиловым циклом // Содействуя экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.144-146.
2. Navarro-Esbrn J., Peris1 B., Collado R., Molys F. Micro-generation and micro combined heat and power generation using «free» low temperature heat sources through Organic Rankine Cycles // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13) Bilbao (Spain), 20-22.03.2013, Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ), №11, 03.2013.
3. Таюрский В. Улусы спасает тушенка. Якутские чиновники сорвали северный завод // М., Российская газета, №6302 от 11.02.2014 г.
4. Велицко В.В. Реконструкция котельных в мини-ТЭЦ и снижение потребления электроэнергии на транспорт тепла в водогрейных котельных // Содействуя

- экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.124.
5. Велицко В.В. Применение регулируемых термодинамических циклов для утилизации низкопотенциального тепла // Сборник материалов V Конференции "ТРИЗ. Практика применения методических инструментов в бизнесе", М., 22-23.11.2013 г.
 6. Велицко В.В. Выявление и нейтрализация угроз государственной безопасности с применением инструментария ТРИЗ на примере угроз инфраструктурного, технологического и юридического характера // Сборник докладов международной конференции «Инструменты создания инноваций для развития предпринимательства», М., 14-15.11.2014, с.102-107.
 7. Велицко В.В. Нестабильные рабочие тела в высокоэффективных циклах тепловых двигателей, применяемых для нужд децентрализованного электроснабжения // Интернет: <http://www.metodolog.ru/node/1786>
 8. Краснов А.Г., Велицко В.В. Системы накопления энергии как элемент инфраструктуры эко-полиса // Сборник материалов XI Международной конференции «Государственное управление: Российская Федерация в современном мире» 30.05-01.06.2013, Секция «Урбанизация – «Экополис XXI века»: теория, практика, сценарии, модели», МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет государственного управления.
 9. Vankeirsbilck I, Vanslambrouck B., Gusev S, Michel De Paepe Energetical, Technical and Economical considerations by choosing between a Steam and an Organic Rankine Cycle for Small Scale Power Generation // ORC 2011, First International Seminar on ORC Power Systems In memory of Prof. G. Angelino, Delft, 23.09.2011, Интернет: <http://www.readbag.com/orc2011-nl-uploads-file-presentations1-energetical-technical-and-economical-consideration-by-choosing-between-a-steam-and-orc-for-small-scale-power-generation>
 10. Karellas S., Schuster A., Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications // International Journal of Thermodynamics, Vol.11 (№3), 08.2008, pp.101-108.
 11. Велицко В.В. Тепловой двигатель с термодинамическим циклом без предварительного сжатия и КПД более 50% // Содействуя экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.128-129.
 12. Велицко В.В. Реконструкция котельных в мини-ТЭЦ и снижение потребления электроэнергии на транспорт тепла в водогрейных котельных // Содействуя экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.130.
 13. Велицко В.В. Высокоэкономичные мини-ТЭЦ для работы на местных топливах // Содействуя экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.137.
 14. Велицко В.В. Бескомпрессионный трубопроводный транспорт природного газа, нефти и нефтепродуктов // Содействуя экономическому развитию России. Проекты международного общественного фонда «Фонд содействия экономическому развитию им. Байбакова Н.К.» за 1996-2011 гг., М., Нефть и газ, 2011, с.131-132.