

**АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА**

*Рассматриваются вопросы использования низкопотенциальных источников тепла с помощью энергетических установок малой мощности работающих по органическому циклу Ренкина.*

**Ключевые слова:** низкопотенциальное тепло, энергоустановки малой мощности, органический цикл Ренкина, рабочее тело.

В последнее время все более актуальными становятся задачи эффективного использования энергетических ресурсов, снижения энергопотерь в промышленности и коммунальном хозяйстве. Активно ведутся работы в области использования «альтернативных» и «нетрадиционных» источников энергии. Известно что, большинство промышленных и технологических процессов, работа механизмов и устройств сопровождается выделением большого количества тепла, которое слабо используется, а рассеивается в окружающем пространстве, т. е. попросту «выбрасывается» (отсюда название — «сбросное тепло»). Сбросное тепло является низкопотенциальным с температурой незначительно (на 10–30°C) большей температуры окружающей среды, поэтому его использование обычным путём затруднено. В тоже время, низкопотенциальное тепло обладает значительной энергией, поэтому его утилизация (преобразование выбрасываемой тепловой энергии в полезную) является важной научно-технической задачей [1]. Решение данной задачи дает возможность развивать децентрализованную энергетику на основе малых электростанций.

Источниками низкопотенциального тепла могут служить **техногенные системы**:

- промышленные предприятия (теплота сжатия газов в компрессорах, теплота продуктов сгорания различного рода топлива и т. д.);
  - системы водяного охлаждения, стоки промышленных предприятий и очистных сооружений (теплота жидкости);
  - биогазовые установки, газогенераторные установки, пиролизеры и т. д. (теплота сгорания топлива, сгенерированного в этих установках);
  - тепловые двигатели транспортных средств (теплота выхлопных газов).
- К ним можно отнести **источники естественного происхождения**:
- геотермальные источники (энергия Земли);
  - солнечные коллекторы, солнечные концентраторы (солнечная энергия).

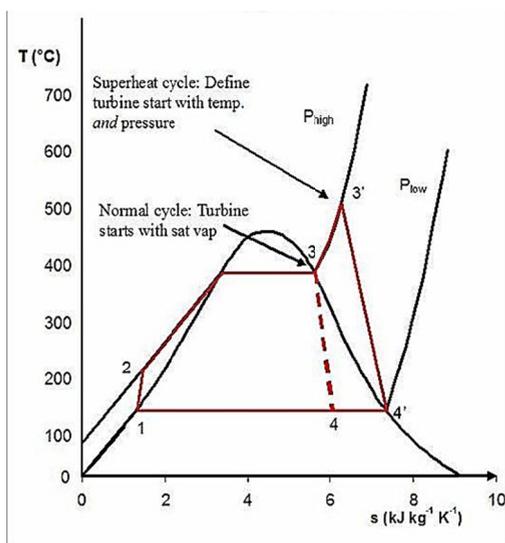
Одним из направлений работ по использованию низкопотенциального тепла является разработка энергетических установок малой (десятки-сотни киловатт) мощности. Подобные установки в полной мере отвечают современной концепции децентрализованного электроснабжения и с легкостью могут ис-

пользоваться как автономные источники электропитания загородных домов, небольших поселков, удаленных от электросетей промышленных объектов, а также как вспомогательные источники электроэнергии автономных объектов.

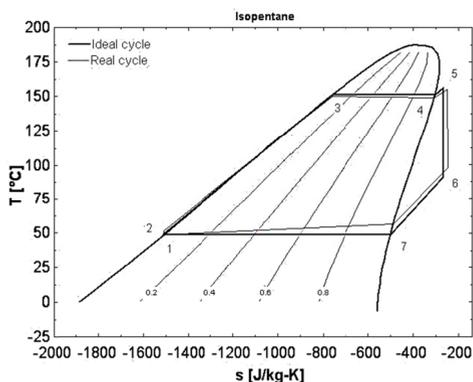
Преобразование низкопотенциальной тепловой энергии может осуществляться в различных термодинамических циклах, но на сегодняшний день наибольшее внимание специалистов привлекает органический цикл Ренкина (ОЦР или Organic Rankine Cycle — ORC) (рисунок 1).

Паро-газовый термодинамический цикл Ренкина преобразует тепло в работу. Тепло подается во внешний замкнутый цикл, который обычно использует воду в качестве рабочего тела. В настоящее время классический цикл Ренкина с водой в качестве рабочего тела обеспечивает приблизительно 85 % мирового производства электроэнергии (рисунок 1, а).

Органический цикл Ренкина отличается от обычного паро-газового цикла Ренкина тем, что вместо воды в качестве рабочего тела используются различные органические вещества, в частности фреоны, применяемые в холодильной технике. Применение ORC позволяет получить более низкие рабочие температуры и относительно высокие рабочие давления в цикле (рисунок 1, б). При этом достигаются относительно высокие значения термического КПД цикла и изэнтропийного КПД расширительной машины [2]. На диаграммах (рисунок 1) по оси ординат отложена температура рабочего тела ( $T$ , °C), а по оси абсцисс энтропия ( $s$ , на 1, а —  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ , на 1, б —  $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ).



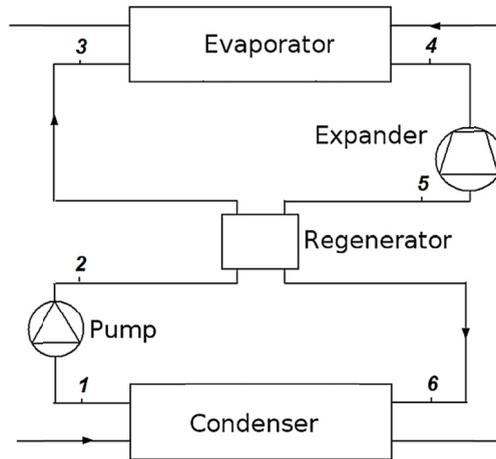
**Рис. 1, а.** TS-диаграмма парового цикла Ренкина



**Рис. 1, б.** TS-диаграмма органического цикла Ренкина (ORC)

Обобщенная структура установки [3], работающей по ORC приведена на рисунке 2. Установка состоит из испарителя (Evaporator) в котором происходит фазовый переход из жидкости в газ. Из испарителя газ поступает на расшири-

тельную машину (Expander), которая механически связана с электрогенератором. После расширительной машины газ поступает в конденсор (Condenser), где он переходит в жидкую фазу. С помощью насоса (Pump) жидкость подается в испаритель (Evaporator). Для повышения общей эффективности установки используют регенератор (Regenerator).



**Рис. 2.** Установка ORC с регенератором

В качестве расширительных машин для привода электрогенераторов в цикле Ренкина малой мощности обычно используют одноступенчатые радиально-осевые турбины, применяемые в криогенной технике (турбодетандеры в ожижителях природного газа, в воздухо-разделительных установках), а также в турбонаддуве автомобильных двигателей. Данный тип турбин обеспечивает достаточно высокую эффективность преобразования энергии при небольших расходах и при относительно больших степенях расширения рабочего тела.

### **Выбор рабочего тела**

Выбор рабочей среды имеет ключевое значение в связи с низкими температурами в цикле. Из-за низкой температуры наблюдается снижение эффективности теплоотдачи. Эффективность теплоотдачи очень сильно зависит от термодинамических свойств жидкостей используемых в рабочем цикле. Для эффективного использования низкопотенциального тепла, обычно используют жидкость, которая имеет более низкую температуру кипения, чем вода. Хладагенты и углеводороды — два наиболее широко используемых компонента для реализации данного цикла.

При выборе рабочей среды необходимо учитывать следующие характеристики жидкостей.

**Кривая изэнтропического насыщения пара.** В связи с тем, что ORC ориентирован на использование низкопотенциальной тепловой энергии, традиционный цикл Ренкина с перегретым состоянием не подходит. В тоже время, небольшой перегрев на выходе испарителя является предпочтительным. В случае «сухой» жидкости необходимо использовать регенератор.

**Низкая точка замерзания, высокая температурная стабильность.** В отличие от воды, органические жидкости обычно претерпевают химическое ухудшение и разложение при высоких температурах. Поэтому максимальная температура источника тепла ограничивается химической стабильностью рабочей жидкости. Температура замерзания рабочей жидкости должна быть ниже, чем самая низкая температура в цикле.

**Высокая теплота парообразования и плотность.** Жидкость с высокой скрытой теплотой парообразования и плотностью будет поглощать больше энергии от источника тепла в испарителе и тем самым уменьшит скорость потока, что в свою очередь приводит к увеличению размеров расширительного и вспомогательного оборудования.

**Низкое воздействие на окружающую среду.** Основные параметры, которые должны быть приняты во внимание, это: потенциал разрушения озонового слоя и потенциал глобального потепления.

**Безопасность.** Жидкость не должна вызывать коррозию, должна быть негорючей и нетоксичной.

Кроме того, при выборе используемого рабочего тела необходимо учитывать следующие факторы: предельное рабочее давление, а также доступность и стоимость.

#### **Разработчики и производители ORC установок**

Сегодня известен ряд фирм, которые занимаются исследованием и серийным выпуском установок работающих по ORC. К ним можно отнести итальянскую Turboden srl, американскую Ormat Technologies Inc, немецкие ADORATEC GmbH, GMK GmbH. Основное направление деятельности этих фирм — получение электроэнергии от геотермальных источников тепла, использование вторичного тепла, а также сжигание биотоплива.

В рамках исследования проводимых по теме «Исследование эффективности использования органических рабочих тел в двигателях с внешним подводом теплоты, утилизирующей низкопотенциальную тепловую энергию технологических процессов» установлено, что электрическая мощность турбин вышеуказанных фирм колеблется в пределах 50...2400 кВт. Топливом служат древесные отходы. Вторичным теплом является тепло выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания и микротурбинных систем, а также вторичное тепло промышленных производств [1–6].

В качестве примера ORC системы, отечественный производитель компания «БПЦ Инжиниринг» предлагает в качестве автономных систем генерации электроэнергии установки, работающие по ORC, WHG50 и WHG125 мощностью 50 и 125 кВт соответственно [7]. В качестве рабочего тела используется фреон HFC–R245fa. Его параметры в установке WHG125: после испарителя 115° С и 15 бар, после расширения в турбине 63° С и 1,8 бар, после экономайзера и охладителя 29° С, насос увеличивает давление жидкости до 16 бар, после экономайзера 48° С и 15 бар. Тепловой поток, подводимый к рабочему телу в испарителе, составляет 879 кВт. В качестве расширительной машины используется микротурбина Capstone. Турбина и генератор представляют собой герметичный силовой блок на магнитных подшипниках со скоростью вращения

26500 об/мин. На выходе установки 3-х фазное напряжение 400 В, 50 Гц, что позволяет работать в режиме параллельно с сетью. Полная заправка рабочего тела составляет 500 кг, а сухой вес установки (без испарителя и охладителя) 3150 кг. В установке WHG50 параметры рабочего тела после испарителя 88°C и 9,6 бар, подвод тепла в испарителе 410 кВт, расход рабочего тела 114 л/мин. В качестве расширительной машины используется запатентованная модель собственного производства.

В качестве технологических преимуществ использования микротурбин приводятся:

- высокоскоростной электрогенератор;
- магнитные подшипники;
- силовая электроника (блок инвертирования);
- отсутствие смазочных материалов;
- отсутствие редуктора и муфты;
- диапазон регулирования от 5% до номинала;
- герметичность системы;
- единственная движущаяся часть – ротор турбины;
- модульность, объединение в кластеры для увеличения мощности.

#### Выводы

1. Проведённый анализ показал, что проблема утилизации тепловой энергии низкопотенциального тепла является актуальной.

2. Существующие на данный момент технические решения используют в своем составе дорогостоящие микротурбинные установки [1–4]. Мощность таких установок как правило превышает 50 кВт.

3. Вместе с тем, актуальным является создание энергоустановок малой мощности до 20 кВт. Здесь наиболее перспективным является применение модифицированного варианта роторно-лопастной машины с внешним подводом теплоты (РЛДВПТ), работающей в качестве расширительной машины по органическому циклу Ренкина.

#### Литература

1. Румянцев М. Ю., Захарова Н. Е., Поликарпов А. В., Понамарева Л. Н., Розе-ноер Т. М., Сигачев С. И. Высокоскоростные турбогенераторы для автономных энергетических установок малой мощности с использованием низкопотенциального тепла. Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надёжности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», ЭНЕРГО-2010, 1–3 июня 2010 г., Москва. В двух томах. Том 1. Издательский дом МЭИ. 2010. С. 240–243.
2. Organic Rankine cycle. Wikipedia. [Электронный ресурс]. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle).
3. Любомир Янчошек, Петер Кунц. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации. Турбины и дизели. 2012. С. 50–53.

4. Денисов-Винский Н., Хармут Шплитхоф. Технические и экономические аспекты использования древесных отходов для выработки электрической энергии в диапазоне от 0,2 до 200 МВт // ЭНЕРГОРЫНОК. № 11. 2011.
5. Research and development for ORC-top products. [Электронный ресурс]. URL: [www.gmk.info/ORC\\_research.589.html](http://www.gmk.info/ORC_research.589.html).
6. CONPOWER. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.conpower.de/>.
7. Тепловой электрогенератор WHG50 и WHG125. Органический цикл Ренкина (ORC). [Электронный ресурс]. URL: [http://bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/doc/BPC\\_presentation\\_2012\\_ORC\\_L.pdf](http://bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/doc/BPC_presentation_2012_ORC_L.pdf).

*S. I. Tikhonov, A. V. Ilyin, Y. N. Lukyanov,  
A. L. Perminov, A. I. Khitrov*

### **STAND-ALONE SMALL POWER PLANTS TO USE OF LOW-POTENTIAL HEAT SOURCE**

*The use of low-grade heat sources into low power plants operating on organic Rankine cycle is considered.*

**Keywords:** low-grade heat, low power plants, Organic Rankine Cycle, work fluid.

Тихонов Сергей Игоревич — заведующий кафедрой «Начертательной геометрии и компьютерной графики», канд. техн. наук, доцент.

Ильин Александр Викторович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Лукьянов Юрий Николаевич — инженер кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Перминов Андрей Леонидович — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Хитров Александр Иванович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент.