

## **Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты**

© В.П. Леонов, В.А. Воронов, К.А. Аписит, А.В. Ципун

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Обоснован выбор органического цикла Ренкина для утилизации теплоты. Приведен алгоритм расчета полезной работы в установках, где температура греющего источника составляет порядка 100 °С и действительный КПД цикла равен примерно 7 %. Проведен анализ различных рабочих тел. Особое внимание уделено выбору детандера. Рассмотрена возможность применения радиальных и осевых турбомашин, роторных, поршневые, пластинчатых и спиральных детандеров. Отдано предпочтение спиральным детандерам, так как они обладают рядом преимуществ, таких как отсутствие клапанов, возможность полного уравнивания, компактность, большой ресурс работы. Проанализировано несколько вариантов применения цикла Ренкина, рассказано о перспективах дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** органический цикл Ренкина, цикл Ренкина, утилизация теплоты.

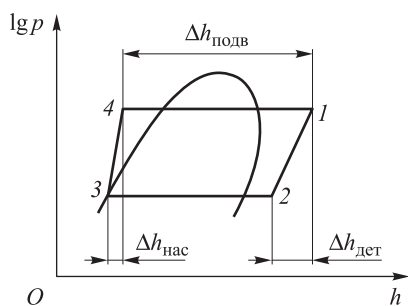
**Постановка проблемы.** В наши дни все острее становится проблема использования энергетических ресурсов, поскольку разрабатываемые месторождения нефти и газа исчерпываются, добыча ресурсов становится дороже. Стоимость электроэнергии до тех пор будет возрастать, пока не найдены новые источники энергии. Вследствие увеличения стоимости электроэнергии оказывается выгоднее найти возможность использования сбрасываемой теплоты, которая выделяется во многих технологических процессах. Эту теплоту можно применять для отопления, получения холода (например, в абсорбционных холодильных машинах) либо механической работы (например, в цикле Ренкина, Брайтона или Стирлинга).

Для утилизации теплоты предпочтительнее использовать цикл Ренкина. Цикл Стирлинга требует больших капитальных затрат на изготовление высокотехнологичных компонентов машины, а для достижения максимального КПД требуются высокое давление в цикле и дорогостоящие рабочие тела, (гелий) или горючее (водород). Цикл Брайтона представляет собой газовый цикл, в котором используется больший расход рабочего тела, чем в цикле Ренкина. Объясняется это тем, что теплоемкость рабочего тела при фазовых переходах гораздо выше, чем теплоемкость газа при обычном теплообмене, а значит, при одном и том же уровне температуры количество теплоты, подводимое к одному килограмму кипящего агента, будет значительно больше, что снизит расход. Кроме того, для сжатия рабочего тела в цикле Брайтона необходим компрессор, а в цикле Ренкина — насос, который является менее габаритной и металлоемкой конструкцией. Вместе с уменьшенным расходом рабочего тела это позволяет достичь минимальных размеров установки при цикле Ренкина, нежели цикле Брайтона.

Проблемам использования цикла Ренкина должно внимание уделяется зарубежными учеными. Так, в работах [1, 2] рассматривается вопрос о применении когенерационной установки для одновременной выработки электрической и тепловой энергии. При этом полученная теплота может применяться для производства горячей воды ( $70 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ), пара или низкопотенциальной теплоты ( $40 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а также холода с уровнем температуры  $7,0 \dots 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (тригенерация). К особенностям цикла Ренкина можно отнести то, что подключение турбогенератора к когенерационной установке является оптимальным решением в тех случаях, когда приоритет отдается выработке электроэнергии, а теплота от когенерации используется в меньшей степени.

Сравнение цикла Ренкина с традиционными циклами, проведенное при разных температурных уровнях, показало, что цикл Ренкина эффективен при более низких температурах источника теплоты и при меньшей мощности установки [3, 4].

Значительное увеличение эффективности цикла Ренкина (рис. 1) может быть достигнуто при использовании высокотемпературных сбросных потоков и достижении максимальной температуры рабочей жидкости с высокой критической температурой [5, 6]. Планируется перевести работу установки, в которой реализуется цикл Ренкина, на более безопасные и экологически чистые рабочие тела с более высокими критическими температурами.



**Рис. 1.** Цикл Ренкина:  
 $p$  — давление;  $h$  — энтальпии

При применении конденсатора, охлаждаемого воздухом, температура конденсации на  $15 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$  выше температуры воздуха (для средней полосы России максимальная температура воздуха составляет примерно  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В испарителе, нагреваемом промежуточным теплоносителем, недорекуперация, как правило, равна  $3 \dots 7 \text{ }^\circ\text{C}$ . С учетом этого температура рабочего тела перед составляет  $90 \dots 95 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При исследовании цикла Ренкина КПД был определен с помощью программы Refprop для хладона R245fa. Температуру в конденсаторе принимали равной  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $323 \text{ K}$ ), температуру в испарителе —  $90 \dots 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , КПД насоса и детандера —  $0,6$ , КПД генератора —  $0,9$ .

Расчет строили на следующих допущениях:

1) КПД генератора, детандера и насоса — постоянные величины, не зависящие от режима эксплуатации;

- 2) недорекуперация в теплообменниках — величина постоянная и не зависит от режима работы;
- 3) гидросопротивления в теплообменниках и трубопроводах не учитываются;
- 4) нет переохлаждения жидкости перед насосом;
- 5) нет теплообмена с окружающей средой.

В результате расчета были определены следующие параметры: давление в испарителе и конденсаторе, перепады энтальпии при изоэнтропных процессах сжатия и расширения рабочего тела.

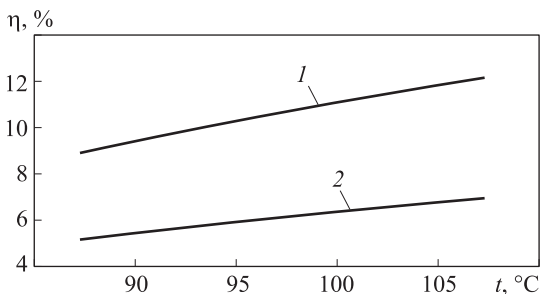
Внутренний действительный КПД  $\eta_{\text{действ}} = N_э / Q_{\text{подв}}$ , где  $N_э$  — электрическая мощность, снимаемая с клемм генератора, Вт;  $Q_{\text{подв}}$  — количество теплоты, подводимое к испарителю, Вт.

Расход рабочего тела кг/с,  $G = Q_{\text{подв}} / \Delta h_{\text{подв}}$ , разность энтальпий в испарителе  $\Delta h_{\text{подв}} = h_1 - h_4$ .

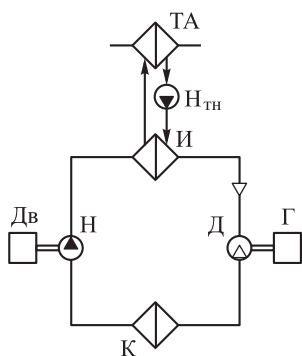
Изоэнтропный перепад энтальпии в детандере  $\Delta h_{\text{дет}} = h_1 - h_2$ , в насосе —  $\Delta h_{\text{нас}} = h_3 - h_4$ .

**Выбор рабочего тела.** Использование теплоты для получения механической работы целесообразно при температуре кипения рабочего тела выше 100 °С (рис. 2). Такая температура достаточна для организации цикла Ренкина, но при этом крайне проблематично использование в качестве рабочего тела воды вследствие того, что температура кипения воды при атмосферном давлении равна 100 °С. Соответственно температура кипения в контуре должна быть ниже, для чего необходимо создать разрежение, а это технологически трудноосуществимо. В свою очередь, низкое давление в цикле приводит к увеличению размеров трубопроводов и к снижению коэффициента теплоотдачи. В связи с этим для указанных условий целесообразно использовать вещества, температура кипения которых при атмосферном давлении ниже, чем воды. К таким веществам относятся хладоны R-11, R-113, R-123 и углеводороды бензин, пентан, изопентан и т.д. Цикл Ренкина, в котором в качестве рабочего тела используются хладоны или углеводороды, получил название «органический цикл Ренкина» (organic Rankine cycle — ORC).

**Рис. 2.** Изменение теоретического (1) и действительного (2) КПД цикла Ренкина в зависимости от температуры кипения (рабочее тело R245fa, температура конденсации 50 °С, перегрева в испарителе 3 °С, КПД насоса и детандера 0,6



В схеме установки, реализующей исследуемый органический цикл Ренкина (рис. 3) в качестве источника используется горячая газообразная среда. Теплота снимается в теплообменном аппарате ТА, и происходит нагрев промежуточного теплоносителя. Промежуточный теплоноситель циркулирует в контуре с помощью насоса  $H_{TH}$ , проходит через испаритель И и отдает теплоту рабочему телу. Рабочее тело кипит в испарителе и в состоянии пара поступает на детандер Д, который понижает давление вещества и отдает механическую работу генератору Г. После детандера рабочее тело поступает в конденсатор К, и, сконденсировавшись, нагнетается насосом Н, приводимым в действие двигателем Дв, обратно в испаритель. В качестве промежуточного теплоносителя используется масло, а конденсатор охлаждается воздухом или проточной водой.



**Рис. 3.** Принципиальная схема установки для утилизации теплоты на основе органического цикла Ренкина

В качестве детандера при больших мощностях (более 50 кВт) используют радиальные и осевые турбомашины, так как расход будет бóльшим при той же степени расширения; при малых мощностях (менее 50 кВт) используют машины объемного типа действия: роторные и поршневые детандеры. Поршневые детандеры в органическом цикле Ренкина применять затруднительно вследствие ряда проблем, возникающих при их эксплуатации (необходимость системы газораспределения, высокие гидрпотери в клапанах, вибрации, шум). Пластинчатые детандеры также использовать нежелательно по причине их невысокого ресурса: от этих систем требуется непрерывная работа.

При малых мощностях на валу рекомендуется использовать спиральные детандеры, так как они обладают рядом преимуществ, таких, как отсутствие клапанов, полная уравниваемость, компактность, большой ресурс работы.

В настоящее время существует несколько основных областей применения органического цикла Ренкина:

*утилизация теплоты* — теплоту можно утилизировать, например, при совместной выработке электрической и тепловой энергии (когенерация), в электростанциях, где используется биотопливо (в России крайне не распространено). Это позволяет эффективно задействовать теплоту сгорания топ-

лива, увеличивая общий КПД установки. В стекольном производстве можно утилизировать теплоту, получаемую после тепловой обработки станка горячим воздухом при температуре около 230 °С, а также отходящие газы, имеющие температуру около 400...500 °С. В химическом производстве утилизировать можно печные и реакционные газы высокой температуры, горячую воду, теплоту, сбросные жидкости и технологические газы, получаемые в печах и колоннах синтеза, а также некоторые другие виды вторичных энергетических ресурсов. Утилизировать можно также органические продукты брожения, горячий выхлоп из печей, выхлопные газы автомобиля и т. д.;

*солнечные тепловые электростанции* (гелиостанции);

*геотермальные станции* — температура в геотермальных источниках варьируется в диапазоне 50...350 °С. При использовании низкотемпературных источников (температура, как правило, меньше 100 °С) эффективность станции зависит от температуры окружающей среды, которая определяет температуру конденсатора.

Следует отметить, что одним из основных преимуществ органического цикла Ренкина является его независимость от внешних природных условий, таких, как ветер или солнце. Для него не важен характер используемой теплоты, что обеспечивает высоко ценимую в малой энергетике автономность при работе.

**Основные перспективы модернизации опытной установки.** В дальнейшем планируется расширить температурный диапазон цикла Ренкина с целью увеличения его эффективности. Также необходимо провести более глубокий анализ рабочих тел, чтобы уменьшить неравновесность процессов теплообмена для снижения потерь цикла (производство энтропии). Следует модернизировать теплообменный аппарат для увеличения потенциально пригодных источников сбросовой теплоты. Большое внимание следует уделить дальнейшей стандартизации компонентов установки с целью максимально возможного уменьшения капитальных затрат на производство установок.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable a Sustainable Energy Rewiews*, 2013, vol. 22, pp. 168–186.
- [2] Brasz L.J., Bilbow W.M. Ranking of Working Fluids for Organic Rankine Cycle Applications. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 12–15, 2004. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1721&context=iracc> (дата обращения 12.02.2015).
- [3] Янчошек Л., Кунц П. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации. *Турбины и дизели*, 2012, март–апрель, с. 50–53.
- [4] Ивлев В.И., Бозров В.М., Воронов В.А. Оценка технических показателей перспективных спиральных пневмомоторов. *Компрессорная техника и пневматика*, 2014, № 1, с. 26.
- [5] Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Испытания спирального детандера. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/articles/594/594.pdf>

- [6] Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Двухступенчатый холодильный цикл с детандером да диоксиде углерода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/articles/595/595.pdf>

Статья поступила в редакцию 12.01.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Леонов В.П., Воронов В.А., Апсит К.А., Ципун А.В. Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1368.html>

**Леонов Виктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Воронов Владимир Андреевич** — аспирант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Апсит Константин Александрович** — студент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Ципун Александр** — студент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## Rankine cycle with low-potential heat source

© V.P. Leonov, V.A. Voronov, K.A. Apsit, A.V. Tsipun

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article justifies the selection of the organic Rankine cycle for waste-heat recovery. An algorithm for calculating the useful work in installations where the temperature of the heating source is about 100 °C and the actual efficiency of the cycle is about 7 % is presented. Different working media has been analyzed. The particular attention has been paid to the selection of the expander. The possibility of using radial and axial turbomachinery, rotor, piston, plate and spiral expanders is considered. The spiral expander is regarded as preferable, because it has a number of advantages, such as the absence of valves, the possibility of full equilibration, compactness, long service life. Several options for the use of the Rankine cycle has been analyzed, the prospects of further research are outlined.*

**Keywords:** organic Rankine cycle, Rankine cycle, waste-heat recovery

### REFERENCES

- [1] Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable a Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, pp. 168–186.
- [2] Brasz L.J., Bilbow W.M. Ranking of Working Fluids for Organic Rankine Cycle Applications. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July. 12–15, 2004. Available at: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1721&context=iracc>
- [3] Yanchoshek L., Kunts P. *Turbiny i dizeli — Turbines and Diesel Engines*, March–April 2012, pp. 50–53.
- [4] Ivlev V.I., Bozrov V.M., Voronov V.A. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika — Compressors and Pneumatics*, 2014, no. 1, p. 26.
- [5] Voronov V.A., Leonov V.P., Rozenoer T.M. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/articles/594/594.pdf>.
- [6] Voronov V.A., Leonov V.P., Rozenoer T.M. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/articles/595/595.pdf>

**Leonov V.P.**, Ph. D. (Eng.), associate professor of the "Refrigerating and cryogenic technology. Air conditioning and life support systems" Department at Bauman Moscow State Technical University.

**Voronov V.A.**, postgraduate student of the "Refrigerating and cryogenic technology. Air conditioning and life support systems" Department at Bauman Moscow State Technical University, engineer of the Center of Research and Education "Power Engineering" at Bauman Moscow State Technical University.

**Apsit K.A.**, student of the "Refrigerating and cryogenic technology. Air conditioning and life support systems" Department at Bauman Moscow State Technical University, engineer of the Center of Research and Education "Power Engineering" at Bauman Moscow State Technical University.

**Tsipun A.V.**, student of the "Refrigerating and cryogenic technology. Air conditioning and life support systems" Department at Bauman Moscow State Technical University, engineer of the Center of Research and Education "Power Engineering" at Bauman Moscow State Technical University.