



Анализ состояния вопроса утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов на объектах малой энергетики



Артур ДМИТРЕНКО



Михаил КОЛПАКОВ

*Артур Владимирович Дмитренко¹,
 Михаил Игоревич Колпаков^{2,1}*

¹ *Российский университет транспорта, Москва, Россия.*

² *Мосгипротранс, Москва, Россия.*

✉ ¹ *ammsv@yandex.ru.*

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов на объектах малой энергетики. Показана перспектива использования технологии органического цикла Ренкина (ОЦР) в качестве технологии утилизации или преобразования низкопотенциальной энергии.

Приведены разработки в области реализации и утилизации бросового тепла. Наиболее перспективные из них представлены в применении ОЦР, который широко используется на геотермальных источниках, в водогрейных котельных, газотурбинных установках. За счёт постоянного растущего сортамента рабочих тел ОЦР может применяться в широком температурном диапазоне, начиная от 100 °С и заканчивая свыше 350 °С. Также ведутся разработки в области проектирования ОЦР-генераторов с целью повышения надёжности отдельных узлов системы, таких как турбины и детандеры. Исходя из вышеперечисленных факторов, можно сделать вывод, что при более глубоком исследовании проблем внедрения ОЦР-технологий они могут стать весьма перспективным направлением в развитии теплотехники.

Определено, что основным фактором, препятствующим широкому внедрению ОЦР-технологии, является высокая стоимость теплообменного оборудования из-за повышенных теплообменных поверхностей. Показано, что проектирование миниэлектростанций и энергокомплексов на основе использования низкопотенциальной энергии требует совершенствования методов математического моделирования для достоверного определения режимов работы и характеристик каждого из агрегатов. К востребованным следует отнести методы моделирования испарительных и конденсационных систем, в том числе турбин и детандеров, работающих на органических низкокипящих рабочих телах. Методики выбора рабочего тела для ОЦР-устройств также оказывают существенное влияние на характеристики установки, которые определяют диапазон эксплуатационных температур и давлений цикла. Решение вышеуказанных задач способно привести к удешевлению теплообменного оборудования, а, следовательно, снижению издержек на проектирование ОЦР-генераторов.

Ключевые слова: низкопотенциальные энергетические ресурсы, органический цикл Ренкина, миниэлектро- и энергокомплексы, математическое моделирование.

Для цитирования: Дмитренко А. В., Колпаков М. И. Анализ состояния вопроса утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов на объектах малой энергетики // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 2 (93). С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-14>.

*Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
 The full text of the article in English is published in the second part of the issue.*

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость рассмотрения технического состояния утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов на объектах малой энергетики диктуется потребностью более экономного расходования энергетических ресурсов вследствие пройденного пика углеводородной добычи, а в России – также реализацией энергетической стратегии до 2030 года¹. На современном этапе развития промышленного производства именно за счёт внедрения энергосберегающих технологий можно повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов, что является одним из основных условий уменьшения топливной составляющей в себестоимости продукции и, соответственно, повышения рентабельности предприятий. Почти все предприятия стационарной энергетики транспорта и других отраслей промышленности, а также сельского хозяйства располагают «избыточной» теплотой рабочего тела в системах охлаждения, обеспечивающих стабильную и непрерывную работу производственных циклов [1–4].

В последнее десятилетие широкое распространение получили установки, работающие по органическому циклу Ренкина (ОЦР) с применением турбогенераторов как для производства электроэнергии, так и действующие по схеме когенерации [5]. Основное оборудование генератора, как правило, включает в себя: теплообменники, обвязочный трубопровод, насосы первичного и вторичного теплоносителя, турбину, электрогенератор, блок автоматики с силовым оборудованием. В последнее время широкое распространение получили блочно-модульные установки благодаря лёгкости монтажа, низким издержкам при перевозке. На практике такие турбинные генераторы имеют довольно широкий диапазон по электрической мощности (50–1000 кВт).

В современной научной литературе представлены результаты аналитического обзора тепловых схем утилизационных энергетических установок, рабочих теплоносителей, методов термодинамической оценки эффективности процессов преобразования теплоты [1–13]. В России первые системные исследо-

вания были проведены М. И. Дунаевским, а затем разработкой технологических схем и циклов занимались М. М. Гришунин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнёв, Е. Д. Федорович [14; 15].

Цель статьи – рассмотреть состояние вопроса по утилизации низкопотенциальных энергетических ресурсов для повышения энергоэффективности объектов малой энергетики и выявить основные проблемы, стоящие перед такими энергокомплексами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В последние десять лет большое внимание в мире уделяется разработке и созданию энергоэффективных электроустановок малой мощности на основе замкнутых паротурбинных циклов в низкокиспящих рабочих телах (НРТ). Энергетический источник теплоты является низкопотенциальным, если его температура не превышает 230–300°C (500–570 К). Принципиально НРТ определяют тип термодинамического цикла, состав оборудования и технико-экономические показатели силовых установок. В наиболее широкую группу входят чистые (не смесевые) НРТ: углеводороды (бутан, пропан, пентан), хладоны (R11, R12, R114, R123, R245fa), аммиак, толуол, дифенил, силиконовое масло и др. Они используются в энергоустановках, реализующих ОЦР, суть применения которого заключается в утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), имеющих температуру 80–350°C (отходящие газы, охлаждающая вода и другие ВЭР технологических процессов) [16].

ОЦР находит применение большей частью:

- на тепловых электростанциях;
- на геотермальных электростанциях;
- на полигонах утилизации биологических отходов;
- на промышленных предприятиях, располагающих в своём производственном цикле бросовой теплотой;
- в газотурбинных установках, двигателях внутреннего сгорания и т.д.

Спектр применения рабочих тел зависит от критериев, предъявляемых к ним: энергетические свойства, низкий озоноразрушающий потенциал, безопасность при эксплуатации.

Энергетические установки на основе ОЦР имеют следующие преимущества:

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года № 1523-р. [Электронный ресурс]: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>. Доступ 09.01.2021.



- невысокие капитальные затраты на турбину в сравнении с пароводяным аналогом;
- нет потребности в системе водоподготовки;
- простая процедура пуска-остановки;
- высокий моторесурс турбинного оборудования (до 30 лет [1]).

Учитывая данные преимущества, использование замкнутых паротурбинных циклов в низкокипящих рабочих телах при внедрении на объектах, имеющих сбросную теплоту, является весьма перспективным.

Использование ОЦР на геотермальных источниках

Довольно интересным примером использования ОЦР является его применение на геотермальных источниках. В качестве источника тепла для ОЦР на геотермальной электростанции выступают тёплые геотермальные воды, которые скважинными насосами из недр земли подаются в испаритель, где и отдают тепло НРТ. Первая в мире геотермальная электростанция (ГеоТЭС) на НРТ, или, как её ещё называют, бинарная ГеоТЭС, была создана в СССР на Камчатке (Паратунская ГеоТЭС) в 1967 году. Источником теплоты были геотермальные воды с температурой 81°C, рабочим агентом был хладон R12, вырабатываемая мощность составляла 680 кВт. В то же время во всем мире активизируется практическое внедрение бинарных ГеоТЭС (США, Мексика, Аргентина, Исландия, Италия, Австрия, Германия, Португалия, Израиль, Таиланд, КНР, Тайвань, Новая Зеландия, Филиппины, Япония). При этом определяющей является тенденция на создание небольших, полностью автоматизированных, не нуждающихся в постоянном обслуживании модульных установок. Лидером в их производстве (до 1000 установленных энергомодулей на пентане мощностью от 40 кВт до 3,5 МВт) является фирма ORMAT (Израиль) [9].

Применение ОЦР с водогрейным котлом

Внедрение на водогрейной котельной ОЦР-технологии позволяет создать когенерацию – одновременную выработку тепловой и электрической энергии. В зависимости от потребителя мини-ТЭЦ может переключаться между режимами выработки как в сторону электроэнергии, так и в сторону теплоснабжения за счёт изменения расхода теплоносителя на испаритель ОЦР-генератора или теплосеть [12].

Внедрение ОЦР-технологий в контур парогазовых установок

При использовании ОЦР с газотурбинными установками (ГТУ) в зависимости от температуры и объёма уходящих газов существует два способа надстройки [13]:

- надстройка ОЦР к комбинированной парогазовой установке (ПГУ) с подключением ОЦР к теплофикационному отбору паровой турбины;
- надстройка ОЦР к ГТУ через водогрейный котёл-утилизатор.

Данные способы позволяют вырабатывать дополнительную энергию на уходящих газах.

Ряд научных учреждений России имеет значительный опыт исследований в области изучения процессов ОЦР: рабочих тел для паротурбинных циклов, построения тепловых схем и расчёта её составляющих элементов (турбины и теплообменное оборудование различных типов) [3].

В исследовании [16] выполнен анализ и обоснование решения задачи энергосбережения на основе реализации замкнутых паротурбинных циклов в низкокипящих рабочих телах для промышленных объектов при использовании ВЭР. Проведено исследование по выбору низкокипящих рабочих тел, применяемых в ОЦР-контурах. Проведены расчёты по оценке возможной получаемой электрической мощности при реализации НРТ турбин на отходящих газах водогрейного котельного агрегата мощностью 100 Гкал/час. Показано, что при максимальном использовании теплоты дымовых газов электрическая мощность установки на НРТ может достигать ~2900 кВт. С целью определения наиболее эффективной утилизации отходящих газов выполнен поиск рациональной тепловой схемы с учётом особенностей существующего технологического цикла. В работе [9] на основе имеющихся режимных карт котельного агрегата выполнены расчётные исследования по определению возможной электрической мощности в зависимости от режима эксплуатации. Расчётные исследования показали, что использование теплоты дымовых газов без дополнительного сжигания топлива ограничивает максимальные температуры НРТ и не позволяет достичь максимальной мощности энергетической установки ОЦР-контура через малый тепловой перепад, вырабатываемый на турбине. Большее количество теплоты можно снять только за счёт увеличения рас-

хода низкокипящего рабочего тела, что не всегда оптимально. Увеличение расхода рабочего тела влечёт за собой увеличение массогабаритных характеристик теплообменного, вспомогательного и турбинного оборудования.

На современном этапе развития замкнутых паротурбинных циклов на низкокипящем рабочем теле целесообразным является выбор варианта, который позволит покрывать собственные потребности теплогенерирующей установки в электрической энергии на уровне 5–10 % без дополнительного сжигания топлива.

При определении целесообразности внедрения ОЦР-цикла необходимо учитывать, что в каждом отдельном случае надо проводить оценку количества и параметров низкопотенциальной теплоты, а также полное технико-экономическое обоснование.

Разработкой и внедрением установок занимаются известные фирмы США, Японии, Бельгии, Израиля, Италии, России и других стран [12; 13; 17; 18].

В настоящее время разработаны установки использования низкопотенциальных ВЭР с температурой 100–120°C, рабочим теплоносителем фреоном R142b и КПД 0,08–0,10. Для каждой температуры источников ВЭР существует необходимость определения теплоносителя, который обеспечивает оптимальный КПД цикла Ренкина. Поэтому для определённого конкретного источника ВЭР разрабатывается тепловая схема установки с её характерными параметрами и рабочим теплоносителем. С понижением температуры источника ВЭР растёт стоимость и сложность оборудования (до 1500–2000\$ за 1 кВт мощности) [10].

Для утилизации ВЭР с температурой 150–170°C используются энергетические установки с рабочим теплоносителем изобутаном (C_4H_{10}) или смесью (изобутан/изопентан).

Для ВЭР с более высокими температурами (200–250°C) разрабатываются тепловые схемы с n-пентаном и гексаном.

Для утилизации ВЭР с температурой выше 300–350°C органические теплоносители изучались недостаточно. Поэтому разрабатывались тепловые схемы установок с водяным паром и диоксидом углерода (CO_2).

Из приведённого выше описания способов внедрения ОЦР-установок можно сделать вывод, что данная отрасль электро-

и теплотехники в достаточной мере проработана, чтобы создавать промышленные образцы. Поэтому ОЦР-установки находят всё более широкое применение в энергетических комплексах. Основными мировыми лидерами, освоившими данную отрасль на текущий момент, являются компании ORMAT, Electrathern, Turboden, которые имеют широкий спектр мощностей, компоновочных решений, а также блочно-модельных решений, упрощающих монтаж и эксплуатацию ОЦР-устройств.

Однако при кажущейся проработанности проблемы проектирования ОЦР-генераторов, одним из сдерживающих факторов повсеместного внедрения данных установок являются высокие капитальные затраты вследствие неоптимальных массогабаритных характеристик теплообменного оборудования. Преодоление этого фактора лежит в составлении таких математических моделей, которые наиболее достоверно описывают процессы в системах испарения, конденсации и привода.

Интересной, с точки зрения анализа, является работа [7]. В ней рассмотрена трёхступенчатая парогазовая установка, в которой предложена схема глубокой утилизации теплоты уходящих газов за счёт внедрения ОЦР-технологии. Схема реализована следующим образом: верхний цикл выражен циклом Брайтона, средний – циклом Ренкина на водяном паре, а нижний – ОЦР. Принципиальная схема ПГУ представлена на рис. 1 [7].

В представленной ПГУ температура перед турбиной высокого давления составляет порядка 1527°C (1800 К), температура уходящих газов верхнего цикла составляет около 477°C (750 К), средний пароводяной цикл функционирует в диапазоне температур 527°C (800 К) перед турбиной среднего давления и 77°C (350 К) в конденсаторе. Температура конденсации в ОЦР может быть ниже 0°C (273 К) за счёт применения воздушных конденсаторов в северных регионах страны, где около восьми месяцев в году температура окружающего воздуха ниже 0°C.

Средний пароводяной цикл можно заместить органическим циклом Ренкина с более низкой температурой конденсации рабочего тела, нежели чем вода, тем самым опустив температурную границу конденсации для более глубокой утилизации тепла в среднем цикле и роста КПД во всей установке в целом.





Рис. 2. Полугерметичный двухвинтовой детандер HSE.85 [19].

провод, заложенный в грунте. В ходе математического моделирования были применены инструменты инженерных методик расчёта и программного комплекса ANSYS CFX. С помощью различных подходов моделирования при рассмотрении данного вопроса предлагалось определить оптимальную протяжённость и диаметр трубопровода. В результате исследования выяснилось, что расхождение конечной длины трубопровода при одинаковой степени сухости пара (0,00) составило более 30 м. По инженерной методике расчёта длина составила около 107 м, тогда как длина, полученная в программном комплексе ANSYS CFX, составила 70 м. При этом не рассматривались: тепловой контакт трубы с грунтом, политропность реального процесса, изменение теплофизических свойств теплоносителя из-за гидравлических потерь.

Как известно, уменьшить габариты теплообменного аппарата возможно и за счёт форсирования теплообмена. Существующие способы интенсификации теплообмена осуществляются за счёт повышения турбулентности потока путём оребрения, создания полусферических выступов по длине стенки канала, шнековых вставок и других методов. Указанные решения нашли широкое применение в проектировании [4; 6].

Менее изученным способом роста теплопроводности рабочего тела является добавление в него незначительных примесей (менее доли процента) наносuspензий в виде оксидов металлов, что увеличивает теплопроводность до 60 % [11]. Данное решение в совокупности с применением детандера из-за его неприхот-

ливости в работе может способствовать росту компактности ОЦР-установки.

Идея утилизации теплоты за счёт ОЦР предложена достаточно давно, но внедрение этой технологии требует решения задач оптимизации проектирования и расчёта всех агрегатов, включённых в схему по утилизации низкопотенциальной энергии [1–4; 6–8; 16–20].

По-прежнему продолжают исследования по совершенствованию методик расчёта агрегатов испарения и конденсации рабочего тела ОЦР, а также турбин и детандеров [1–4; 6–8; 16–20].

ВЫВОДЫ

Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что основным фактором, который препятствует широкому внедрению ОЦР-технологии, является высокая стоимость теплообменного оборудования ввиду повышенных теплообменных поверхностей. В связи с этим проектирование таких миниэлектро- и энергокомплексов требует совершенствования методов математического моделирования для достоверного определения режимов работы и характеристик каждого из агрегатов. К таким востребованным методам следует отнести методологии расчёта испарительных и конденсационных систем, а также турбин и детандеров, работающих на органических низкокипящих рабочих телах. Решение вышеуказанных задач способно привести к удешевлению теплообменного оборудования, а, следовательно, снижению издержек на проектирование ОЦР-генераторов.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитренко А. В., Гайтров М. Ю. Модернизация тепловой системы железнодорожных станций // Мир транспорта. – 2017. – № 3 (70). – С. 94–103. [Электронный ресурс]: <https://mitr.elpub.ru/jour/article/view/1216/1492>. Доступ 09.01.2021.
2. Дмитренко А. В., Колосова М. А. Модернизация энергетических комплексов железнодорожных станций и возможности использования низкопотенциальной теплоты на основе органического цикла Ренкина // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 3. – С. 39–45. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30607270&>. Доступ 09.01.2021.
3. Дмитренко А. В., Колосова М. А. Особенности расчёта характеристик аппаратов энергетических комплексов, использующих низкопотенциальную энергию // Мир транспорта. – 2020. – № 6 (91). – С. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-6-108-117>
4. Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A. The possibility of using low-potential energy based on the organic Rankine cycle and determination of hydraulic characteristics of industrial units based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures. JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 21, Iss. 1, pp. 125–132. DOI: 10.17654/HM021010125.
5. Карабарин Д. И., Михайленко С. А. Особенности проектирования установок органического цикла Ренкина // Журнал СВУ. Техника и технологии. – 2019. – № 6. – С. 733–745. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-ustanovok-organicheskogo-tsikla-renkina/pdf>. Доступ 09.01.2021.
6. Дмитренко А. В., Колосова М. А. Определение гидравлических характеристик промышленных агрегатов на основе стохастической теории гидродинамики // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Уфа, 20–24 августа 2019. – Сб. трудов. – Т. 2. – С. 342–343. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41394385>. Доступ 09.01.2021.
7. Галашов Н. Н., Цибульский С. А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трёх циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 5. – С. 44–55. [Электронный ресурс]: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/53444>. Доступ 09.01.2021.
8. Gequn, Shu; Lina, Liu; Hua, Tian; Haiqiao, Wei; Xiaofei, Xu. Performance comparison and working fluid analysis of subcritical and transcritical dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. Energy Conversion and Management, October 2013, Vol. 74, pp. 35–43. DOI:10.1016/j.enconman.2013.04.037.
9. Engine. Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe. Workshop 5. Electricity generation from Enhanced Geothermal Systems. 14–16 September 2006. Strasbourg, France. Workshop abstracts. [Электронный ресурс]: http://engine.brgm.fr/web-offlines/conference-Electricity_generation_from_Enhanced_Geothermal_Systems_-_Strasbourg_France_Workshop5/resource-9-2-ENGINE_BOA_WS5_Strasbourg_14-16092006.pdf. Доступ 09.01.2021.
10. Gimelli, A., Luongo, A., Muccillo, M. Efficiency and cost optimization of a regenerative Organic Rankine Cycle power plant through the multi-objective approach. Applied Thermal Engineering, 2017, Vol. 114, pp. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.009>.
11. Masoudeh, A. Heat transfer mechanisms in water-based nanofluids. Doctoral Dissertation. University of Louisville, 2015. [Электронный ресурс]: <https://ir.library.louisville.edu/etd/2311/>. Доступ 09.01.2021.
12. Kler, A. M., Zharkov, P. V., Epishkin, N. O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. Energy, 2019, Vol. 189, 116230. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116230.
13. Lorenz, M. Biomasse – KWK mit einem Dampf – Schraubenmotor. Köhler & Ziegler Anlagentechnik GmbH, 2006. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.org/23822543-Biomasse-kwk-mit-einem-dampf-schraubenmotor.html/>. Доступ 09.01.2021.
14. Дунаевский Н. И. Техничко-экономические основы теплофикаций. – М.–Л.: Госэнергоздат, 1952. – 256 с.
15. Гришутин М. П., Севастьянов А. П., Селезнев Л. И., Федорович Е. Д. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами. – Л.: Машиностроение, 1988. – 219 с.
16. Клер А. М., Маринченко А. Ю., Потанина Ю. М., Жарков П. В. Оптимизационные исследования энергогенерирующих установок на древесной биомассе, реализующих органический цикл Ренкина // Известия РАН. Энергетика. – 2019. – № 6. – С. 110–120. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41549138>. DOI: 10.31857/S0002331019060062.
17. Öhman, H. Implementation and evaluation of a low temperature waste heat recovery power cycle using NH₃ in an Organic Rankine Cycle. Energy, 2012, Vol. 2, pp. 74–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.074>.
18. Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., Spliethoff, H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering, 2008, Vol. 29, pp. 1809–1817. [Электронный ресурс]: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-005440531/document>. Доступ 09.01.2021.
19. Повышение эффективности поршневых двигателей с использованием технологии органического цикла Ренкина. [Электронный ресурс]: http://bitzer.ru/povishenie_ffektivnosti_porshnevih_dvigateli_s_ispolzovaniem_tehnologii_organicheskogo_tsikla_renkina. Доступ 09.01.2021.
20. Генерация «чистой» электроэнергии из избыточного тепла. Органический цикл Ренкина с детандером BITZER HSE.85. [Электронный ресурс]: <http://www.aerkom.ru/unitORC/>. Доступ 09.01.2021.
21. Кишалов А. Е., Зиннатуллин А. А. Математическое моделирование конденсации рабочего тела в системе отдачи тепла холодному источнику энергоустановки малой мощности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – № 5 (148). – С. 934–949. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-kondensatsii-rabocheho-tela-v-sisteme-otdachi-tepla-holodnomu-istochniku-energoustanovki-maloy/pdf>. Доступ 09.01.2021. ●

Информация об авторах:

Дмитренко Артур Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, atmsv@yandex.ru.

Колпаков Михаил Игоревич – инженер АО «Мосгипротранс», аспирант кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, fdiolit@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 25.01.2021, одобрена после рецензирования 23.04.2021, принята к публикации 26.04.2021.