

УДК 621

Анализ возможности выбора рабочих тел для органического цикла Ренкина с учетом современных тенденций

Ганков Максим Сергеевич

gankovms@student.bmstu.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к рабочим телам, используемым в органическом цикле Ренкина, а также произведен анализ их эффективности с учетом современных тенденций к уменьшению использования гидрофторуглеродов, регламентированное Кигалийской поправкой. Для рассматриваемых природных низкокипящих рабочих тел, а также некоторых наиболее эффективных ГФУ были определены линии наиболее эффективных параметров цикла. Показаны области температур, в которых каждое из рассматриваемых веществ имеет преимущество перед другими.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, низкокипящие рабочие тела, оптимальные параметры, Кигалийская поправка

При проектировании теплоутилизационных установок, реализующих органический цикл Ренкина (ОЦР), одной из ключевых задач является выбор наиболее подходящего рабочего тела, чему посвящено значительное число публикаций [1–4], но быстро меняющаяся мировая ситуация по их регулированию приводит к необходимости постоянной актуализации этих данных. Однако стоит отметить, что критерии их выбора остаются неизменными [5]:

- высокая экономичность цикла при заданных начальных температурах;
- высокая термическая стабильность вещества в рабочем диапазоне температур;
- безопасность к окружающей среде и пожаробезопасность;
- низкие температуры замерзаний;
- дешевизна.

В качестве рабочих веществ для ОЦР применяются низкокипящие рабочие тела (НРТ), которые имеют температуру кипения ниже, чем у воды, что позволяет использовать тепло от низкопотенциальных источников, начальная температура которых ниже 300 °С. Данные вещества по своему происхождению делятся на природные и синтезированные, а по составу — на «чистые», содержащие одно химическое вещество, и смесевые, являющиеся смесью нескольких «чистых» веществ [6].

Наибольшее распространение в энергетике получили синтезированные рабочие тела, к которым относятся фреоны (хладоны), которые по способности оказания воздействия на озоновый слой делятся на несколько групп:

- группа А: хлорфторуглероды (ХФУ) — вещества, оказывающие истощение озонового слоя;

- группа В: гидрохлорфторуглероды (ГХФУ) — вещества, оказывающие незначительное влияние на истощение озонового слоя;
- группа С: гидрофторуглероды (ГФУ) — озонобезопасные вещества.

Из-за потенциального вреда, который данные рабочие тела могут причинить окружающей среде, их использование регулируется Монреальским протоколом [7] и поправками к нему. Так в 2010 г. произошел полный отказ от ХФУ, а к 2030 г. должен быть достигнут полный отказ от ГХФУ.

В 2021 г. в РФ вступила в силу Кигалийская поправка Монреальского протокола, которая предусматривает постепенное уменьшение производства и потребления ГФУ до уровня 15 % от базового периода к 2036 г. [8]. Данные вещества хоть и не оказывают озоноразрушающее воздействие, но они являются парниковыми газами с высоким показателем глобального потепления, измеряемом в CO_2 эквиваленте. В связи с этим, их ввоз на территорию РФ и использование в настоящее время контролируется.

Исходя из вышесказанного, выбор подходящего НРТ следует производить при учете дополнительных ограничений. Таким образом, целесообразно уделять повышенное внимание природным рабочим телам, но также учитывать вероятную возможность применения ГФУ.

В данной работе рассматривались следующие природные рабочие тела: циклопентан, изопентан, изобутан, а также некоторые наиболее эффективные ГФУ: R245fa и R236fa. Для каждого сравнения органических рабочих тел производится тремодинамический расчет идеального цикла Ренкина с использованием набора функций CoolProp [9]. Во всех расчетах давление в конденсаторе задавалось как давление насыщения p_k при температуре $t_k = 32^\circ\text{C}$, а начальные параметры принимали разные значения вдоль каждой начальной изобары p_0 , выбираемой из интервала $[\approx 1,1p_k, p_{\max}]$ с шагом $\Delta p = 0,2$ МПа, где $p_{\max} = 3,3$ МПа — произвольно выбранное максимальное начальное давление цикла. Для каждой изобары было определено состояние, которое способствует получению максимума КПД, что в конечном итоге позволило построить линии оптимальных параметров на h - s диаграмме конкретного рабочего тела, например циклопентана, представленной на рис. 1.

В случае если оптимальные параметры цикла оказывались в двухфазной области, то дополнительно определялся КПД по линии насыщения для сравнения с оптимальным значением. Во всех подобных случаях было установлено, что КПД цикла для параметров на линии насыщения оказывается незначительно меньше, чем на линии оптимальных параметров. Таким образом, сделан вывод о целесообразности доведения начальных параметров до состояния сухого насыщенного пара с целью предотвращения потерь от влажности.

Исходя из полученных линий оптимальных параметров для природных НРТ, также были построены зависимости КПД циклов от начального давления p_0 для природных НРТ, представленные на рис. 2.

Также получен график зависимости КПД эффективных ГФУ, представленный на рис. 3.

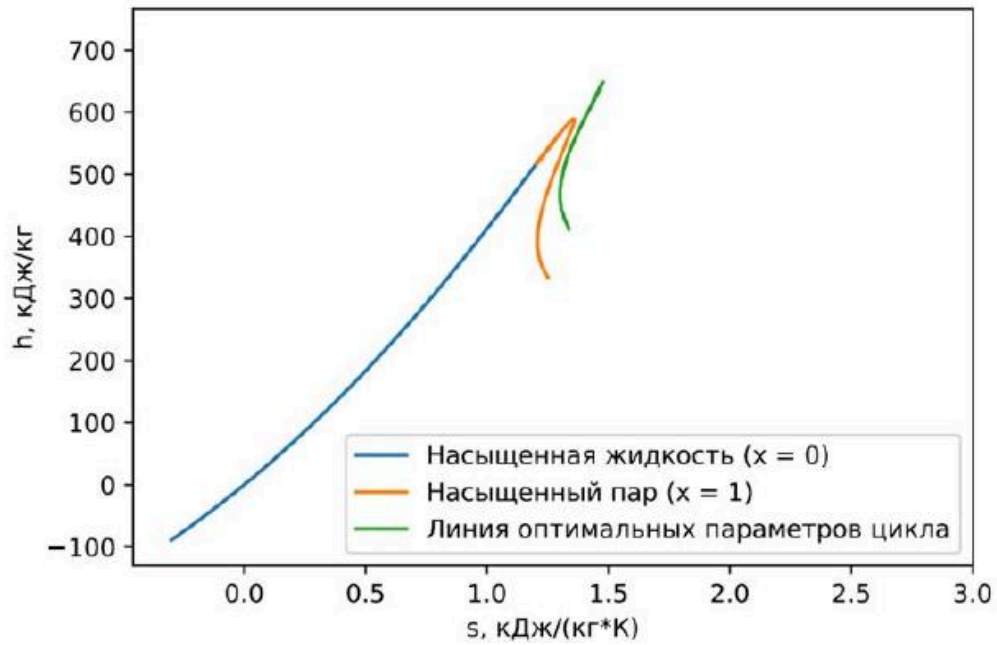
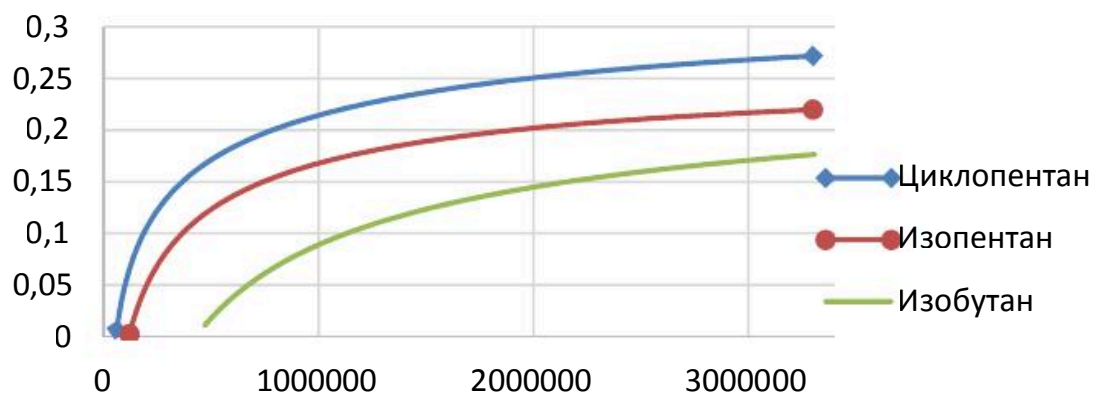
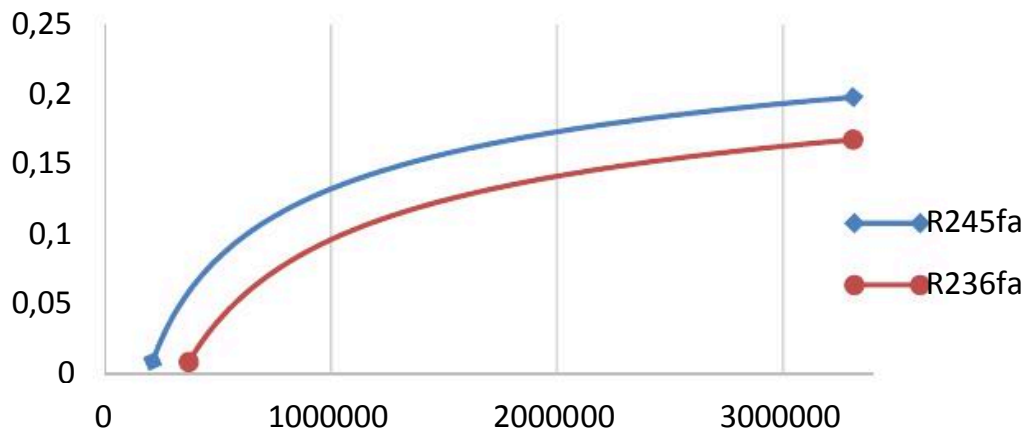


Рис. 1. Линия оптимальных параметров цикла для циклопентана

Рис. 2. График зависимости КПД природных НРТ от p_0 Рис. 3. График зависимости КПД ГФУ от p_0

Обобщение результатов проделанных расчетов сведены в таблицу.

Результаты расчетов

Показатель	Природные НРТ			ГФУ	
	Изобутан	Изопентан	Циклопентан	R245fa	R236fa
Эффективный диапазон температур, °C	50–85	50–125	>130	50–100	50–80
Термический КПД	0,121 (max)	0,183 (max)	0,183 (min)	0,153 (max)	0,112 (max)
p_k , МПа	0,428	0,117	0,055	0,191	0,341

По полученным результатам исследования можно сделать вывод, что эффективность цикла на природных НРТ в большинстве случаев сравнима или превосходит ГФУ, что особенно заметно в «высокотемпературной» области (более 130 °C), где циклопентан имеет значительное превосходство. Однако в области до 100 °C фреон R245fa имеет значительное преимущество за счет высокого КПД, сравнимого с КПД изопентана, а также пожаробезопасности, по сравнению с последним. Однако, не учитывая во внимание фактор пожароопасности рабочих тел, наиболее подходящим рабочим телом является изопентан за счет давления конденсации близкого к атмосферному, что должно вызывать меньшие проблемы при проектировании уплотнений по сравнению с другими веществами.

Литература

- [1] Дологлонян А.В., Матвеев В.Т. Выбор рабочего тела и оптимизация параметров органического цикла Ренкина. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2019, № 5 (337), с. 139–150.
- [2] Ильичев В.Ю., Ганков М.С. Влияние типов рабочего тела на цикл энергетической установки, работающей на органическом рабочем теле. *Вопросы науки*, 2023, № 4, с. 63–68.
- [3] Тимошенко Д.В., Александров А.А. Установки органического цикла Ренкина. *Ученые заметки ТОГУ*, 2024, т. 15, № 1, с. 92–101.
- [4] Овсянник А.В., Ключинский В.П. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 2022, т. 65, № 1, с. 76–88.
- [5] Рагулин И.Ю., Нестеренко И.С., Фесенко А.А., Королев А.Д. Подход к выбору рабочего тела для органического цикла Ренкина. *Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности. XVI Междунар. науч.-практ. конф.: сб. материалов*. Москва, АЛЕФ, 2023, с. 147–153.
- [6] Сапожников М.Б., Тимошенко Н.И. Электрические станции на низкокипящих рабочих телах. *Теплоэнергетика*, 2005, № 3, с. 73–77.
- [7] Монреальский протокол о веществах, разрушающих озоновый слой Земли. URL: <http://ozone.unep.org/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer/32506> (дата обращения 04.11.2024).

- [8] О принятии поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой. Постановление Правительства РФ от 25.03.2020 № 333. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102704946> (дата обращения 04.11.2024).
- [9] CoolProp. URL: <http://www.coolprop.org> (дата обращения 04.11.2024).

Analysis of the possibility of selecting working fluids for the organic Rankine cycle, taking into account current trends

Gankov M.S. gankovms@student.bmstu.ru

Ilyichev V.Y. ilyichev.vyu@bmstu.ru

BMSTU (KB), Kaluga, Russia

The main requirements for working fluids used in the organic Rankine cycle are considered, and their effectiveness is analyzed taking into account current trends towards reducing the use of hydrofluorocarbons, regulated by the Kigali Amendment. For the considered natural low-boiling working fluids, as well as some of the most effective HFCs, the lines of the most effective cycle parameters were determined. The temperature ranges in which each of the substances under consideration has an advantage over the others are shown.

Keywords: organic Rankine cycle, low-boiling working fluids, optimal parameters, Kigali Amendment