

УДК 656.6

**Тимофеев Виталий Никифорович<sup>1</sup>**, доцент, д.т.н., заведующий кафедрой  
электромеханических объектов водного транспорта

e-mail: timofeev.vitaly2010@yandex.ru

**Салахов Ильяс Рахимзянович<sup>1</sup>**, доцент, к.п.н., директор института

e-mail: vguvtkazan@yandex.ru

**Кутепова Людмила Михайловна<sup>1</sup>**, к.п.н., доцент кафедры электромеханических  
объектов водного транспорта

e-mail: masa\_m@bk.ru

**Тимербулатова Ильдия Равилевна<sup>1</sup>**, к.т.н., начальника отдела ВО

e-mail: it70@mail.ru

<sup>1</sup> Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Деватаева – Казанский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», г. Казань, Россия.

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

*Аннотация.* Статья решает задачу создания устройства, позволяющего осуществить прямое преобразование отработавшей тепловой энергии судовой энергетической установки и тепловой энергии вспомогательного котла в электрическую энергию с использованием органического цикла Ренкина (ОЦР), который представляет собой замкнутый цикл, содержит испаритель, паровую турбину, генератор, конденсатор, электрический насос. ОЦР заправляется низкокипящим веществом.

*Ключевые слова:* судовой дизель, дизель-генератор, вспомогательный котел, судовые энергетические установки, тепловая энергия, органический цикл Ренкина, низкокипящее вещество.

Значительная часть тепловой энергии судовой энергетической установки (СЭУ) используется крайне неэффективно, зачастую просто рассеивается в окружающей среде. В последнее время большие усилия прилагаются для того, чтобы каким-то образом использовать низкопотенциальную энергию, которая в огромном количестве вместе с продуктами сгорания и охлаждающей жидкостью выбрасывается в окружающую среду.

Несмотря на большое количество способов решения задач по утилизации тепловой энергии СЭУ, например, патент № 92247, H01L 35/28 [1]; патент № 166326. Россия, МПК В 63 Н 23/24 [2], в статье предлагается новая конструкция утилизации СЭУ на основе органического цикла Ренкина (ОЦР).

Современные системы утилизации тепловых отходов ДВС дают возможность использовать не только тепло выхлопных газов, но и тепловую энергию системы охлаждения. Как отмечается в работе С. Куилина и др.[3] за счет применения установки с ОЦР удалось повысить мощность двигателя на 19.2 кВт, при этом его термическая эффективность возросла с 28.9% до 32.7%.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому в статье устройству является выбранное в качестве прототипа устройство, описанное в статье Ю Ли, Тианхао Танг [4]. В статье излагаются результаты использования ОЦР в дизельной установке морского судна. В устройстве три источника объединены в три группы:

– вода в рубашке охлаждения → выхлопные газы;

- продувочный воздух → выхлопные газы;
- вода в рубашке → продувочный воздух → выхлопные газы.

Было изучено влияние массового расхода жидкости, давления испарения и коэффициента извлечения источника тепла на тепловые характеристики и доли рекуперации источника тепла на тепловые характеристики и экономические показатели SHEORC. Одноцелевая оптимизация с выходной мощностью в качестве цели и многоцелевая оптимизация с эксергетической эффективностью и приведенной стоимостью энергии (LCOE) в качестве целей выполняются. Результаты анализа показывают, что в сочетании вода рубашки охлаждения → отработавший газ и вода рубашки охлаждения → продувочный воздух → источник отработавших газов позволяет осуществить рекуперацию тепла, благодаря которой SHEORC может получить наилучшую производительность. Результаты оптимизации показали, что R245ca имеет наилучшие тепло экономические характеристики во всех трех комбинациях источников.

Основным недостатком данной статьи является то, что в работе не используются другие источники тепловой энергии судовой энергетической установки (СЭУ): отработавшая тепловая энергия дизель – генератора и тепловая энергия вспомогательного котла, что снижает эффективность утилизации СЭУ.

В статье решается задача создания устройства, позволяющего осуществить прямое преобразование отработавшей тепловой энергии судовой энергетической установки и тепловой энергии вспомогательного котла в электрическую энергию с использованием ОЦР, при этом получаем новый технический результат за счет повышения эффективности СЭУ утилизацией отработавшей тепловой энергии главных дизельных, дизель-генераторной установок и тепловой энергии вспомогательного котла.

На рис. 1 представлено устройство для преобразования отработавшей тепловой энергии судовой энергетической установки в электрическую энергию.

ОЦР представляет собой замкнутый цикл, содержит испаритель 19, паровую турбину 20, генератор 21, конденсатор 23, электрический насос 22. ОЦР заправляется низкокипящим веществом (НВ). При выборе НВ необходимо учитывать ряд, предъявляемых к ним требований: дешевизна; хорошие теплофизические свойства; не токсичность; отсутствие экологического воздействия на окружающую среду (озоновый слой, парниковый эффект); замерзание при достаточно низких отрицательных температурах, что важно для климатических условий северных регионов.

Тепловая энергия судовой энергетической установки включает в себя: 1) источник отработавшей тепловой энергии, который образуется при работе главного судового дизеля; 2) источник отработавшей тепловой энергии, который образуется при работе дизель-генератора, на стоянке в ожидании выгрузки груза или при других стоянках; 3) источник тепловой энергии вспомогательного котла, который создается на стоянках в осеннее время, когда судно стоит на якоре: главный судовый дизель и дизель - генератор находятся в нерабочем состоянии, а отопление судна производится вспомогательным котлом. Первые два источника 1), 2) отработавшей тепловой энергии вместе с продуктами сгорания и охлаждающей жидкостью выбрасываются в окружающую среду. Чтобы исключить этот недостаток, в статье предусматривается повторное использование источников 1), 2) отработавшей тепловой энергии следующим образом.



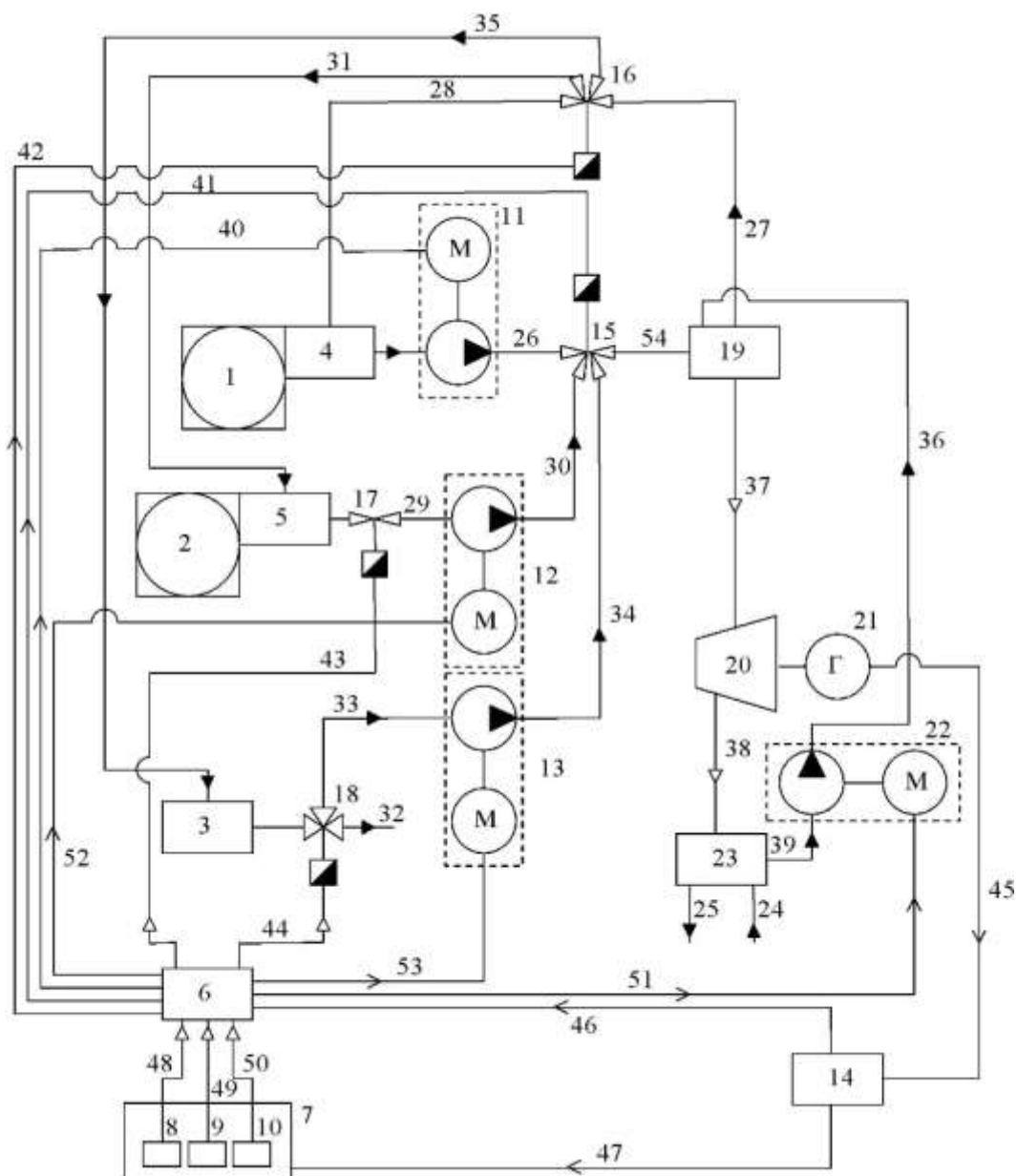


Рисунок 1 – Принципиальная схема устройства утилизации тепловой энергии СЭУ: 1 – главный судовой дизель; 2 – дизель-генератор; 3 – вспомогательный котел; 4 – водоводяной теплообменник главного судового дизеля; 5 – водоводяной теплообменник дизель-генератора; 6 – блок управления; 7 – пульт управления; переключатель; 8 – главного судового дизеля 1; 9 – дизель-генератора 2; 10 – вспомогательного котла 3; 11, 12, 13 – циркуляционный электрический насос (ЭН); 14 – потребитель электроэнергии; 15 – первый электрический четырехходовой кран (1ЭЧХК15); 16 – второй электрический четырехходовой кран (2ЭЧХК16); 17 – электрический запорный вентиль (ЭЗВ17); 18 – электрический трехходовой вентиль (ЭТХВ18); 19 – испаритель; 20 – паровая турбина; 21 – генератор; 22 – электрический насос; 23 – конденсатор; 26, 54, 27; 28; 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 – каналы теплоносителя; 36, 37, 38, 39 – каналы низкокипящего вещества; 24, 25 – каналы забортной воды; 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53 – каналы электрической энергии

1) Источник отработавшей тепловой энергии главного судового дизеля 1, образуемый во время его работы в виде греющего теплоносителя в результате теплообмена с теплообменниками систем охлаждения, наддувочного воздуха и отработавших газов (на чертеже не показаны), поступает в водоводяной теплообменник главного судового дизеля 4, куда одновременно, по замкнутому контуру через канал 27, 2ЭЧХК16, канал 28, нагреваемый теплоноситель поступает из испарителя 19, где в результате теплообмена с

греющим теплоносителем в водоводяном теплообменнике главного судового дизеля 4 происходит подогрев нагреваемого теплоносителя, который по каналу 26, ЭН 11, 1ЭЧХК15, каналу 54, подается в испаритель 19.

2) Аналогичный процесс происходит, с источником отработавшей тепловой энергии дизель – генератора 2, образуемый во время его работы в виде греющего теплоносителя в результате теплообмена с теплообменниками систем охлаждения, наддувочного воздуха и отработавших газов (на чертеже не показаны), поступает в водоводяной теплообменник дизель-генератора 5, куда одновременно, по замкнутому контуру через канал 27, 2ЭЧХК16, канал 31, поступает нагреваемый теплоноситель из испарителя 19, где в результате теплообмена с греющим теплоносителем в водоводяном теплообменнике дизель-генератора 5 происходит подогрев нагреваемого теплоносителя, который насосом 12 через каналы 29, 30, 1ЭЧХК15, канал 54, подается в испаритель 19.

3) Источник тепловой энергии вспомогательного котла 3 образуется во время его работы, в виде греющего теплоносителя, который подается по каналу 32 через электрический трехходовой вентиль 18 насосом 13 по каналам 33, 34, 1ЭЧХК15 и каналу 54 в испаритель 19. Другая часть теплоносителя, по каналу 32 через электрический трехходовой вентиль 18 подается потребителю теплоты.

Устройство для преобразования тепловой энергии судовой энергетической установки в электрическую энергию работает следующим образом.

Для выполнения своего рейса запускается главный судовый дизель 1. Тогда пользователь переключателем 8 приводит данное устройство в действие. Блок управления 6 подачей электроэнергии по каналам 40, 41, 42, 51 приводит в действие 1ЭЧХК15, 2ЭЧХК16, насосы 11, 22. При этом 1ЭЧХК15 открывает каналы 26, 54, закрывает каналы 30, 34; 2ЭЧХК16 закрывает каналы 31, 35, открывает канал 27, 28. Устройство начинает работать. Насос 11 начинает подавать нагретый теплоноситель из теплообменника 4 по каналу 26 через 1ЭЧХК15, канал 54 в испаритель 19. Одновременно начинает работать насос 22 и НВ по каналу 36 подается в испаритель 19. В испарителе 19 происходит теплообмен между нагретым теплоносителем и низкокипящим веществом, в результате низкокипящее вещество превращается в пар с высоким давлением. Выходя из испарителя 19, полученный пар по каналу 37 поступает в турбину 20 и, расширяясь, совершает работу, вал которой связан с генератором 21. Происходит выработка электрической энергии в генераторе 21, которая по каналу 45 поступает потребителю электроэнергии 14. Отработанный пар из турбины 20 по каналу 38 поступает в конденсатор 23, где в результате теплообмена забортной водой, поступающей по каналу 24, конденсируется и превращается в жидкость, которая по каналу 39 подается в насос 22 и цикл повторяется.

А нагреваемый теплоноситель из испарителя 19 через канал 27, 2ЭЧХК16, канал 28 подается в водоводяной теплообменник главного судового дизеля 4, где происходит теплообмен и далее цикл повторяется.

После окончания рейса судно становится на рейд в ожидании выгрузки груза или для других целей. Судно становится на якорь и останавливается главный судовый дизель 1. В этом случае для обеспечения необходимыми энергетическими параметрами запускается дизель- генератор 2 и после его прогрева включается предлагаемое устройство.

Тогда пользователь переключателем 9 подачей по каналу 49 электроэнергии БУ 6 приводит данное устройство в действие. Блок управления 6 подачей электроэнергии по каналам 41, 42, 43, 51, 52 приводит в действие 1ЭЧХК15, 2ЭЧХК16, ЭЗВ17 и насосы 12, 22. При этом каналы 54, 30, 31, 27 открываются, а каналы 34, 26, 28, 35 закрываются. Электрический запорный вентиль 17 откроет канал 29.

Тогда нагретый теплоноситель из теплообменника 5 насосом 12 через каналы 29, 30, 1ЭЧХК15 и канал 54 подается в испаритель 19.

Аналогично одновременно начинает работать насос 22 и НВ по каналу 36 подается в испаритель 19. В испарителе 19 происходит теплообмен между нагретым теплоносителем



и низкокипящим веществом, в результате низкокипящее вещество превращается в пар с высоким давлением. Выходя из испарителя 19, полученный пар по каналу 37 поступает в турбину 20, вал которой связан с генератором 21, и, расширяясь, совершает работу. Происходит выработка электрической энергии в генераторе 21, которая по каналу 45 поступает потребителю электроэнергии 14.

При эксплуатации СЭУ осенью или в зимнее время во время стоянки судна на рейде в ожидании выгрузки судна или других мероприятий для отопления судовых помещений начинает работать вспомогательный котел 3. В этом случае для обеспечения судна энергетическими параметрами может быть использовано предлагаемое устройство.

Тогда пользователь переключателем 10 подачей по каналу 50 электроэнергии приводит БУ 6 данное устройство в действие. Блок управления 6 подачей электроэнергии по каналам 41, 42, 51, 53 приводит в действие 1ЭЧХК15, 2ЭЧХК16, ЭТХВ18 и насосы 13, 22. При этом каналы 54, 34, 35, 27 открываются, а каналы 30, 26, 28, 31 закрываются. ЭТХВ18 откроет каналы 32, 33. Канал 33 может быть использован для отопления нагретым теплоносителем помещений судна.

Тогда нагретый теплоноситель из вспомогательного котла 3 насосом 13 по каналам 33, 34, 1ЭЧХК15 и канал 54 подается в испаритель 19.

Аналогично одновременно начинает работать насос 22 и НВ по каналу 36 подается в испаритель 19. В испарителе 19 происходит теплообмен между нагретым теплоносителем и низкокипящим веществом, в результате низкокипящее вещество превращается в пар с высоким давлением. Выходя из испарителя 19, полученный пар по каналу 37 поступает в турбину 20 и, расширяясь, совершает работу, вал которой связан с генератором 21. Происходит выработка электрической энергии в генераторе 21, которая по каналу 45 поступает потребителю электроэнергии 14. Полученный источник электроэнергии начинает обеспечивать судно электроэнергией и поэтому дизель-генератор 2 останавливается.

Таким образом, устройство для преобразования тепловой энергии судовой энергетической установки в электрическую энергию позволяет вырабатывать дополнительную электрическую энергию в условиях эксплуатации речного судна, что приводит к повышению эффективности судовой энергетической установки.

#### **Список литературы:**

1. Патент № 92247, H01L 35/28. Судовой термоэлектрический генератор / В.Н. Тимофеев. Опубл. 10.03.2010. Бюл. № 7.
2. Патент № 166326. Россия, МПК В 63 Н 23/24. Судовая энергосберегающая установка / В.Н. Тимофеев, Л.В. Тузов, О.К. Безюков, В.А. Жуков, Н.Ф. Тихонов, Д.В. Тимофеев. Опубл. 20.11.2016. Бюл. №32.
3. Quoilin S., Van Den Broeck M., Declaye S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P.168-186. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028> (дата обращения 28.04.2023)
4. Youyi Li, Tianhao Tang. Performance Analysis and Optimization of a Series Heat Exchangers Organic Rankine Cycle Utilizing Multi-Heat Sources from a Marine Diesel Engine. URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/23/7/906> (дата обращения 28.04.2023)

## **UTILIZATION OF THERMAL ENERGY OF A SHIP POWER PLANT BASED ON THE ORGANIC RANKINE CYCLE**

Vitaly N. Timofeev, Ilyas R. Salakhov, Liudmila M. Kutepova, Ilsiya R. Timerbulatova

*Abstract.* The article solves the problem of creating a device that allows direct conversion of the waste thermal energy of a ship power plant and the thermal energy of an auxiliary boiler into



electrical energy using the organic Rankine cycle (ORC), which is a closed cycle, contains an evaporator, a steam turbine, a generator, a condenser, an electric pump. ORC is filled with a low-boiling substance.

*Keywords:* marine diesel, diesel generator, auxiliary boiler, marine power plants, thermal energy, organic Rankine cycle, low-boiling substance.

