

УДК 621.43

**А.В. Локтев, Д.Н. Варсеев**  
**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА**  
**В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ТАНКЕРА**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Представлено исследование варианта использования теплового насоса в судовой энергетической установке танкера. Оценена возможность практического применения теплового насоса на конкретном судне. Представленная информация в основном относится к использованию данных устройств в стационарных условиях.

**Ключевые слова:** энергетическая установка, тепловой насос, танкер, котельная установка, судно.

Применение тепловых насосов в судовой энергетической установке (СЭУ) позволяет снижать эксплуатационные затраты за счет экономии топлива. Это достигается уменьшением потерь тепловой энергии от работающего оборудования СЭУ (утилизацией теплоты) [1]. В настоящее время около 50 % энергии выделяемой при сгорании топлива в СЭУ отдается в окружающую среду из них с уходящими продуктами сгорания 30-40 %, с охлаждающей забортной водой 10-15 % [2].

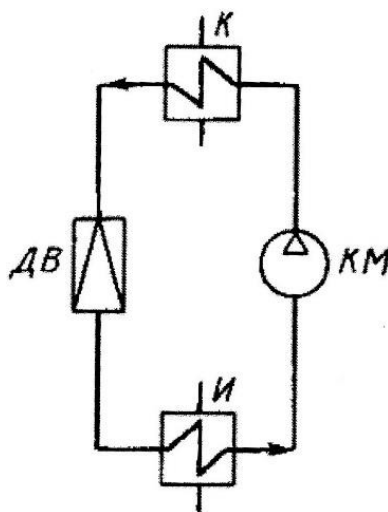
Источники теплоты характеризуются высоким уровнем температур:

- температура выхлопа у двухтактных двигателей  $265 \div 350$  °С и у четырехтактных двигателей –  $380 \div 500$  °С;
- вода системы охлаждения дизельных двигателей имеет температуру  $65 \div 95$  °С.

Традиционным способом утилизации теплоты является установка утилизационных котлов в выхлопных трубопроводах двигателей для получения пара или нагретой воды. Применяемые в настоящее время на судах системы утилизации теплоты весьма разнообразны по конструктивному исполнению и относительному объему используемой теплоты. При этом в первую очередь используется теплота высокотемпературных источников (выхлопные газы, вода систем охлаждения, наддувочный воздух двигателей и др.) В данных системах утилизации необходимым условием является то, что нагреваемая среда должна иметь температуру ниже, чем температура используемого теплоносителя. Существенно расширяются возможности систем утилизации при использовании в них тепловых насосов, которые позволяют передавать теплоту от теплоносителя с низкой температурой к теплоносителю с более высокой температурой [3].

Тепловой насос – устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой. Тепловой насос для своей работы потребляет энергию для работы привода. Большинство современных тепловых насосов оснащены электроприводом, как наиболее надежным и простым в эксплуатации. Возможны также варианты с приводом от ДВС или гидротурбины. Рабочим телом теплового насоса (ТНУ) обычно является жидкость с низкой температурой кипения (фреон, аммиак) (рис. 1). Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителей, а испаритель – теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту. Теплоприемник в тепловом насосе получает теплоту эквивалентную совершаемой внешней работе и теплоту, перенесенную от теплоотдатчика, поэтому, коэффициент преобразования энергии в тепловом насосе всегда больше единицы. Процесс переноса теплоты от более холодной среды к более нагретой происходит за счет циркуляции в замкнутом контуре рабочего тела (фреон, аммиак). Рабочее тело при сжатии компрессором нагревается, отдавая теплоту в конденсаторе, а затем расши-

ряется и охлаждается в испарителе, забирая теплоту от низкотемпературной среды. Таким образом, процесс идет за счет разницы давлений, которая обеспечивается компрессором и дросселирующим устройством.



**Рис. 1. Принципиальная схема компрессионного идеального теплового насоса**  
*К – конденсатор; И – испаритель; КМ – компрессор; ДВ – дроссельный клапан.*

Коэффициент преобразования теплового насоса – отношение теплопроизводительности к электропотреблению, зависит от уровня температур в испарителе и конденсаторе и колеблется в различных системах в диапазоне от 2,5 до 5, т.е., на 1 кВт затраченной электрической энергии тепловой насос позволяет получить от 2,5 до 5 кВт тепловой энергии. Температурный уровень теплоснабжения от тепловых насосов составляет  $25 \div 85$  °С – для промышленных ТН. Экономичность и долговечность теплового насоса в основном определяется работой компрессора. В ТН применяются спиральные, поршневые и винтовые компрессоры [4].

Испаритель служит для отбора теплоты из окружающей среды и в нем теплоноситель из жидкости превращается в пар. Испаритель конструктивно выполняется в виде кожухотрубного, змеевикового, или пластинчатого, типа «труба в трубе» теплообменника. В ТН используются испарители преимущественно кожухотрубные и пластинчатые теплообменники. При этом пластинчатые испарители имеют более высокую эффективность теплообмена, более компактны и более устойчивы к замораживанию при внезапной остановке. В качестве регулятора потока используется гидравлический дроссель. Хладон дросселируется в регулирующем устройстве (РУ), понижая свое давление и, соответственно, температуру до давления и температуры в испарителе (И). Неправильно подобранные расширительные устройства усложняют управление и являются причиной снижения производительности системы. Расширительное устройство может пропускать слишком много жидкости в испаритель, что повлечет за собой попадание на всасывание компрессора капель жидкости [5]. В качестве хладагентов в ТН используются хладоны R134a и R407C. Оба хладагона относятся в соответствии со стандартном ASHRAE к классу A1 – низкотоксичных, пожаробезопасных веществ. Озоноразрушающий потенциал этих хладонов равен нулю. Хладоны R134a и R407C безопасны для окружающей среды.

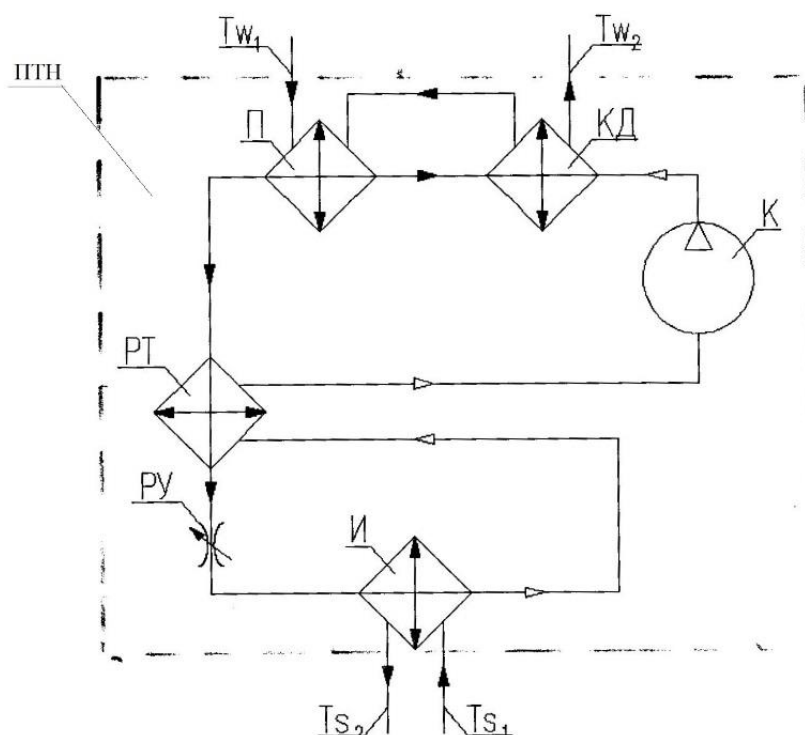
Тепловые насосы широко применяются при строительстве жилых и промышленных зданий для нужд отопления с использованием вторичных тепловых ресурсов, тепла грунта и близлежащих водоемов [6]. Применение тепловых насосов на судах носит пока единичный характер по ряду причин, например:

- необходимость дополнительного объема для размещения на судне оборудования тепловых насосов и других элементов и трубопроводов с хладагентом;

- наличие переменных режимов работы оборудования судовой энергетической установки и судовых потребителей теплоты.

Данные проблемы требуют тщательного анализа экономической эффективности дополнительной глубокой утилизации и исследование для конкретного судна оптимальных вариантов схемных решений [7,8]. При проектировании танкера с ГЭУ мощности  $2 \times 2100$  кВт была проведена детальная проработка применения теплового насоса для глубокой утилизации тепловых потерь при работе оборудования. Для этого был тщательно проанализирован состав потребителей тепловой энергии (отопление, горячее водоснабжение, подогрев груза, воды в цистернах). Из всех потребителей тепловой энергии, суммарная мощность которых составляет около 5000 кВт на первом этапе были отобраны для дальнейшего рассмотрения суммарной потребляемой мощностью 78,59 кВт. Для остальных потребителей необходим теплоноситель со слишком высокой температурой ( $t > 100$  °С) или требуются слишком большие дополнительные площади для размещения тепловых насосов.

Схема подключения тепловых насосов к штатным судовым системам приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема подключения теплового насоса (ПТН) к системам судна:**

*К – компрессор; КД – конденсатор; П – переохладитель;  
 РТ – регенеративный теплообменник; РУ – регулирующее устройство, И – испаритель;  
 $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$  – подвод и слив из ПТН – воды низкотемпературных источника теплоты;  
 $T_{w1}$ ,  $T_{w2}$  – подвод и подача нагреваемой воды в судовую систему теплоснабжения*

Принцип работы ПТН в данной схеме следующий. В межтрубное пространство испарителя (И) подается пресная вода с охлаждения главного двигателя, где она охлаждается за счет кипения (испарения) в трубном пространстве испарителя (И) хладона. Пары хладона из испарителя (И) постоянно отсасываются компрессором и, проходя регенеративный теплообменник (РТ), подогреваются вследствие теплообмена с протекающим внутри труб теплообменника жидким хладоном. Компрессор (К) сжимает подогретые пары хладона до давления конденсации направляет их в межтрубное пространство конденсатора (КД).

В трубное пространство конденсатора (КД) подается нагреваемая вода теплосети. На наружной поверхности труб в межтрубном пространстве КД пары хладагента охлаждаются и конденсируются, превращаясь в жидкость, которая затем поступает в переохладитель (П) жидкого хладагента, где охлаждается за счет теплообмена с обратной водой теплосети. Далее жидкий хладагент проходит внутри труб регенеративного теплообменника (РТ), охлаждаясь дополнительно за счет теплообмена с парами хладагента, и дросселируется в регулирующем устройстве (РУ), понижая свое давление и, соответственно, температуру до давления и температуры в испарителе (И).

Парожидкостная смесь, образующаяся в результате дросселирования, кипит в испарителе, получая теплоту через стенки труб от низкотемпературной воды (слив с охлаждения двигателя). Образующиеся пары хладагента отбираются компрессором, замыкая рабочий цикл. Таким образом рабочее тело (хладагент) циркулирует в замкнутом контуре ПТН, претерпевая изменения агрегатного состояния и перенося теплоту от более низкотемпературного теплоносителя к теплоносителю с более высокой температурой за счет затраты энергии на работу компрессора.

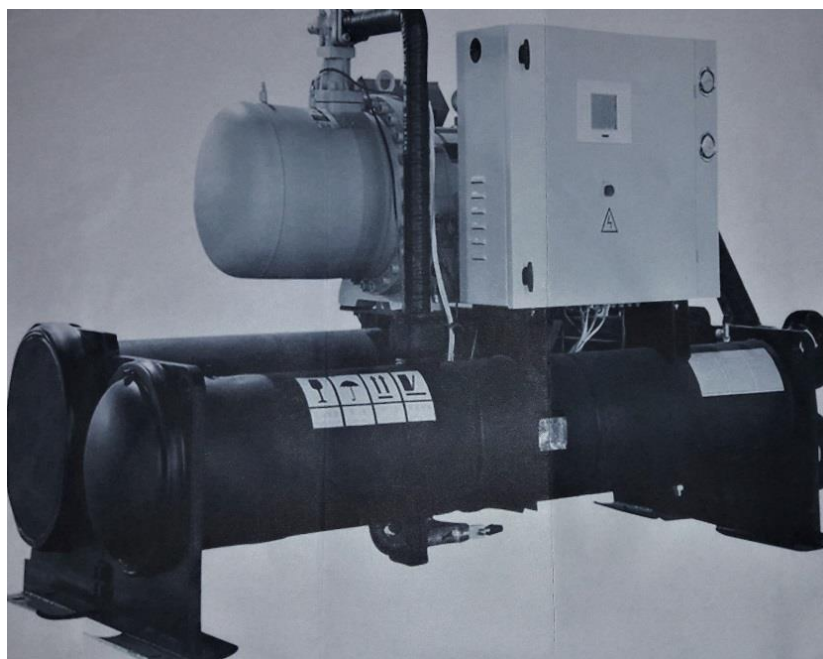


Рис. 3. Тепловой насос NAWEN (SE70SD)

Характеристики данной схемы ПТН NAWEN (SE70SD):

- теплопроизводительность 78,7 кВт;
- потребляемая электрическая мощность 17 кВт/ч;
- выходная температура теплоносителя 25-75° С;
- минимальный проток воды 14,9 м<sup>3</sup>/ч;
- габариты (Ш x Г x В) 600x1600x1315 мм;
- масса 690 кг.

Схема размещения приведена на рис. 4.

Рассмотрим технико-экономическую эффективность применения разработанной схемы теплоснабжения. При этом альтернативным вариантом обеспечения теплотой системы отопления и горячего водоснабжения использование теплоты от вспомогательной котельной установки. Основными вопросами при анализе являются: стоимость оборудования, возможность размещения на судне, расход топлива для получения тепловой энергии.

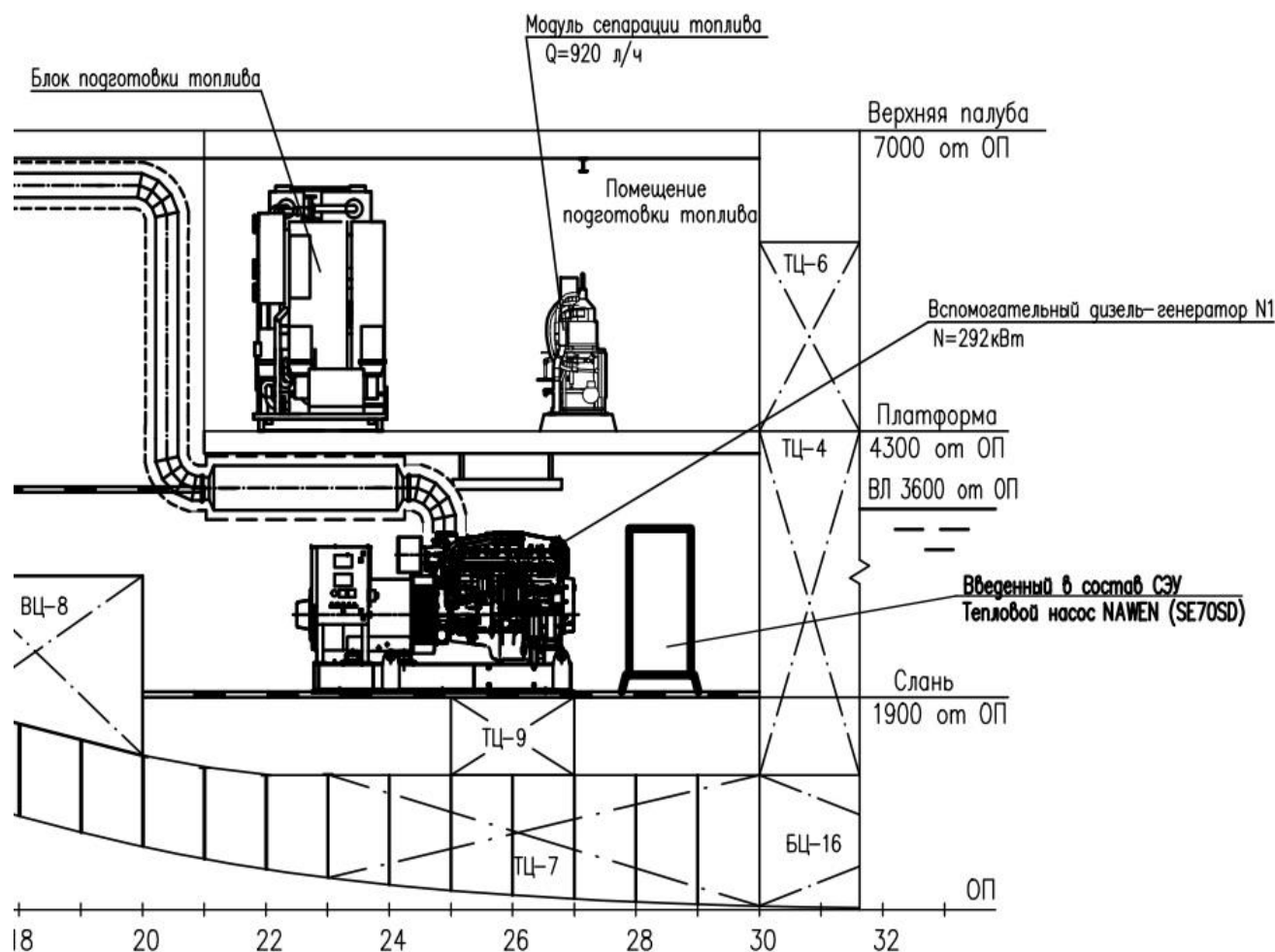


Рис. 4. Схема размещения оборудования ПТН в МКО

### Выводы

1. Большая тепловая мощность вспомогательной котельной установки танкера (около 5000 кВт) и незначительная мощность (менее 100 кВт) потребителей, для которых может быть реально использован тепловой насос, приводит к существенному увеличению стоимости оборудования. Если стоимость котлоагрегата первоначально составит около 6 млн руб., то при уменьшении его мощности за счет перевода части потребителей (78,58 кВт) на тепловой насос получается следующая ситуация со стоимостью. Возможное уменьшение стоимости котлоагрегатов составит не более 100 тыс. руб., а стоимость введения в состав СЭУ теплового насоса NAWEN (SE70SD) составляет 118 500 руб., т.е., стоимость увеличивается более чем на 1 млн руб.

2. Экономия дизельного топлива при переводе части потребителей теплоты на новую схему с использованием теплового насоса составит около 80 л в сутки, при этом учитывается КПД котлов и дизель-генераторов, от которых подводится электропитание к теплому насосу. С учетом режимов эксплуатации танкера окупаемость дополнительных затрат на введение в состав СЭУ теплового насоса составит около 18 месяцев.

3. Конструктивная проработка проекта танкера показала, что размещение оборудования ПТН в машинно-котельном отделении (МКО) танкера является реальным.

*Библиографический список*

1. Селиверстов, В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках [Текст] / В.М. Селиверстов. – Л.: Судостроение, 1973. – 256 с.
2. Соболенко, А.Н. Судовые энергетические установки: дипломное проектирование. Ч. 2. [Текст] / А.Н. Соболенко, Р.Р. Симашов. – М.: Моркнига, 2015. – 426 с.
3. Васильев, Г.П. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. [Текст] / Г.П. Васильев, Л.В. Хрустачев, А.Г. Розин, И.М. Абуев. – М.: ГУП «НИАЦ», 2001. – 202 с.
4. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т.1. [Текст] / Б.С. Петухов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 561 с.
5. Захаров А.П. Судовое холодильное оборудование и кондиционирование [Текст] / А.П. Захаров. – М.: Транспорт, 1976. – 210 с.
6. Калнинь, И.М. Тепловые насосы: вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.М. Калнинь, И.К. Савицкий // Холодильная техника. 2000. № 10. С. 2-6.
7. Варсеев Д.Н. Применение тепловых насосов в судовых энергетических установках [Электронный ресурс] / Варсеев Д.Н., Локтев А.В. // Транспортные системы, 2018. № 2(8). С. 63-67.
8. Varseev, D.N. Effizienz des Einsatzes von Wärmepumpen bei Schwimmeranlagen [Текст] / D.N. Varseev, A.V. Loktev // Aspire to Science: материалы Международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. С. 637-642.