

УДК 621.3

И. В. КАЛИНИЧЕНКО, А. А. АНДРЕЕВ, В. И. СВИРИДОВ

*Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИКЛА ТЕПЛОНАСОСНОЙ ПАРПРОИЗВОДЯЩЕЙ УСТАНОВКИ**

Для определения эффективности теплонасосной паропроизводящей установки была разработана математическая модель компьютерного расчета её цикла. Для построения эффективной математической модели были определены первостепенные физические связи и соотношения. Установлены иерархические связи между элементами математической модели, что определяет синтез всей системы и алгоритм её реализации на компьютере. Приведены особенности расчета и анализа схемы теплонасосной паропроизводящей установки для получения водяного пара двух давлений 0,3 и 0,5 МПа.

Ключевые слова: теплонасосная паропроизводящая установка, математическая модель, блок-схема, генератор пара, промежуточный сосуд, рабочий цикл.

Постановка проблемы

В качестве главных двигателей на судах применяются, как правило, малооборотные двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Большие мощности судовых ДВС, соответственно объемы сбросной теплоты и парниковых газов, ставят остро проблему ее утилизации [1 – 3]. Использование на танкерах в холодной зоне теплового насоса (ТН) в качестве теплонасосной парогенерирующей установки (ТНПУ), утилизирующей в испарителе низкопотенциальную теплоту (НПТ) воды, охлаждающей втулки цилиндров судовых ДВС, является одним из перспективных путей решения проблемы повышения эффективности комплексного использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) судовых ДВС. Полученный в ТНПУ водяной пар давлением 0,3...0,5 МПа можно использовать для нужд общесудовых потребителей и потребителей судовой энергетической установки (СЕУ) кроме подогревателей тяжелого топлива на ходовом режиме [4 – 7]. Однако для обоснованной оценки эффективности применения ТНПУ в каждом конкретном случае, а также для оптимального выбора ее рабочих параметров с использованием комплексного критерия оптимизации параметров работы ТНПУ необходимо разработать компьютерную математическую модель (ММ) для расчета цикла ТНПУ.

Повышение эффективности теплонасосных паропроизводящих установок на судах требует исследования их характеристик методами численного экспериментирования, предполагающими взаимодополняющее и сбалансированное использование натурального эксперимента и математического моделирования. Задачей в работе для математического

моделирования является: определение комплекса оптимальных параметров ТНПУ; оценка влияния оптимизируемых параметров на показатели ТНПУ; расчёт основных энергетических и массогабаритных показателей ТНПУ; повариантное нахождение технических характеристик отдельных элементов ТНПУ; построение режимных характеристик ТНПУ.

Анализ последних исследований и публикаций

Как показал анализ исследований и публикаций по данной тематике [4 – 6], в оптимизационных методиках также отсутствует учет экологического влияния эксплуатации теплонасосных установок на окружающую среду как вследствие прямого воздействия – эмиссии (выбросов) рабочего агента (РА), так и за счет косвенного воздействия – дополнительной эмиссии углекислого газа CO₂, выделяемого в процессе сжигания органического топлива при выработке электроэнергии для привода машин и механизмов, входящих в состав ТНПУ.

Целью исследования является разработка математической модели и построение блок-схемы для компьютерного расчета цикла ТНПУ с учетом комплексного критерия оптимизации параметров работы судовой ТНПУ, учитывающим экологическое влияние на окружающую среду при эксплуатации установки.

Изложение материала исследования

На первом этапе создания ММ для компьютерного расчета рабочего цикла ТНПУ ставилась задача

обоснованного выбора принципиальной схемы установки. Так как на судах водяной пар требуется, как правило, трех давлений: 0,3, 0,5 и 0,9 МПа [8, 9], то первоначально рассматривалась схема работы установки трех давлений. Однако, учитывая возможность высокотемпературного разложения хладонов, являющихся рабочим телом ТНПУ, и с целью упрощения установки, окончательно была принята схема на рис. 1. При этом предполагается, что водяной пар высоких параметров (0,9 МПа) вырабатывается в утилизационном котле за счет теплоты отходящих газов ДВС.

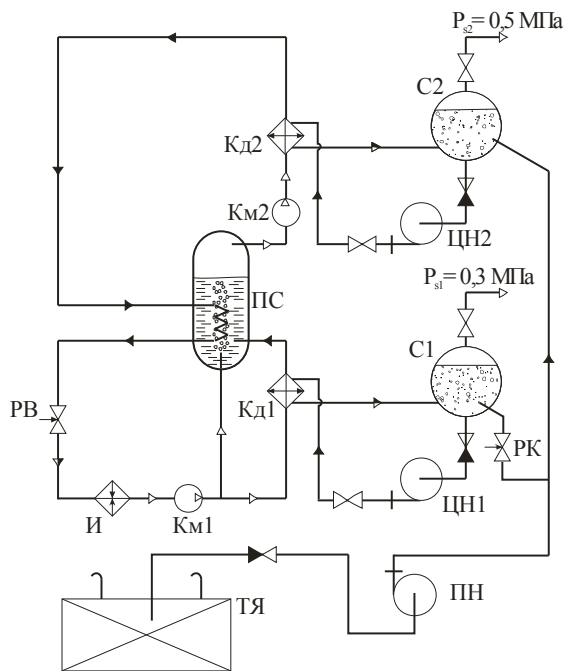


Рис. 1. Принципиальная схема теплонасосной паропроизводящей установки двух давлений

Последовательность рабочих процессов в установке следующая (см. рис. 1). Рабочий агент ТНПУ кипит в испарителе И, отбирая низкопотенциальную теплоту системы охлаждения ГД. Далее он сжимается до промежуточного давления в компрессоре первой ступени Км1 и разделяется на два потока.

Первый поток конденсируется в конденсаторе Кд1, являющимся генератором водяного пара низкого давления ($P_{s1} = 0,3$ МПа), и в жидком состоянии поступает в промежуточный сосуд (ПС). Туда же поступает и второй поток пара промежуточного давления после компрессора первой ступени Км1. Из промежуточного сосуда ПС пар поступает на всасывание в компрессор второй ступени Км2. После сжатия в нем хладон конденсируется в конденсаторе Кд2, который является генератором водяного пара высокого давления ($P_{s2} = 0,5$ МПа). Далее жидкий хладон высокого давления охлаждается в змеевике промежуточного сосуда ПС, дросселируется в

регулирующем вентиле РВ и опять при низком давлении подается на вход в испаритель И.

Построение и реализация математической модели (ММ) ТНПУ осуществлялись в соответствии с системно-иерархическим подходом, предполагающим непрерывное целостное представление о ТНПУ как о единой системе; при этом полная ММ являла собой систему уравнений, которая, согласно принципа декомпозиции реальной ТНПУ, имела вид совокупности ММ отдельных элементов (подсистем) и условий связей между ними. Для построения эффективной ММ были определены первостепенные физические связи и соотношения, то есть проведена редукция ММ. Отдельные математические модели элементов ТНПУ в совокупности составляли основу ММ ТНПУ, которая дополнялась методикой расчёта термодинамических, калорических и теплофизических свойств рабочих агентов ТНПУ в характерных точках цикла. Для этих целей использовался информационно-вычислительный комплекс (ИВК) "Tersvo" [10], база данных которого позволяет моделировать свойства 70 различных индивидуальных веществ во всех фазовых состояниях, а при необходимости может быть расширена и далее.

Алгоритм расчёта цикла ТНПУ представлен на рис. 2. Исходные параметры:

- тепловая нагрузка на испаритель Q_0 ;
- адиабатный КПД хладонового компрессора $\eta_{ад}$;
- температура пресной воды системы охлаждения ГД на входе и выходе $t_{в1}$ $t_{в2}$;
- расход насыщенного водяного пара низкого давления G_{s1} ;
- температуры кипения низкого и среднего давлений в конденсаторах, соответственно $t_{кип1}$ $t_{кип2}$;
- энтальпии водяного пара низкого и среднего давлений на выходе из конденсаторов, соответственно H_{s1} H_{s2} ;
- энтальпия питательной воды на выходе из теплового ящика H_w .

В расчете цикла ТНПУ для определения промежуточных параметров использовалось последовательное приближение по температуре $t_{2ад}$ при известном значении давления $P_{пр}$. Найденная по температуре t_1 начала сжатия энтропия S_1 сравнивалась с полученной энтропией $S_{2ад}$ в конце адиабатного сжатия в первой ступени компрессора. При значительном отличии сравниваемых параметров изменялась температура $t_{2ад} = t_{2ад} + 0,1$ и цикл повторялся.

В случае, если полученные промежуточные значения энтальпии $H_{2ад}$ и температуры $t_{2ад}$ при адиабатном (энтропийном) сжатии находятся в области парожидкостной смеси фреона, значение энтальпии $H_{2ад}$ принимается равным значению энтальпии на линии насыщения $H''_{пр}$.

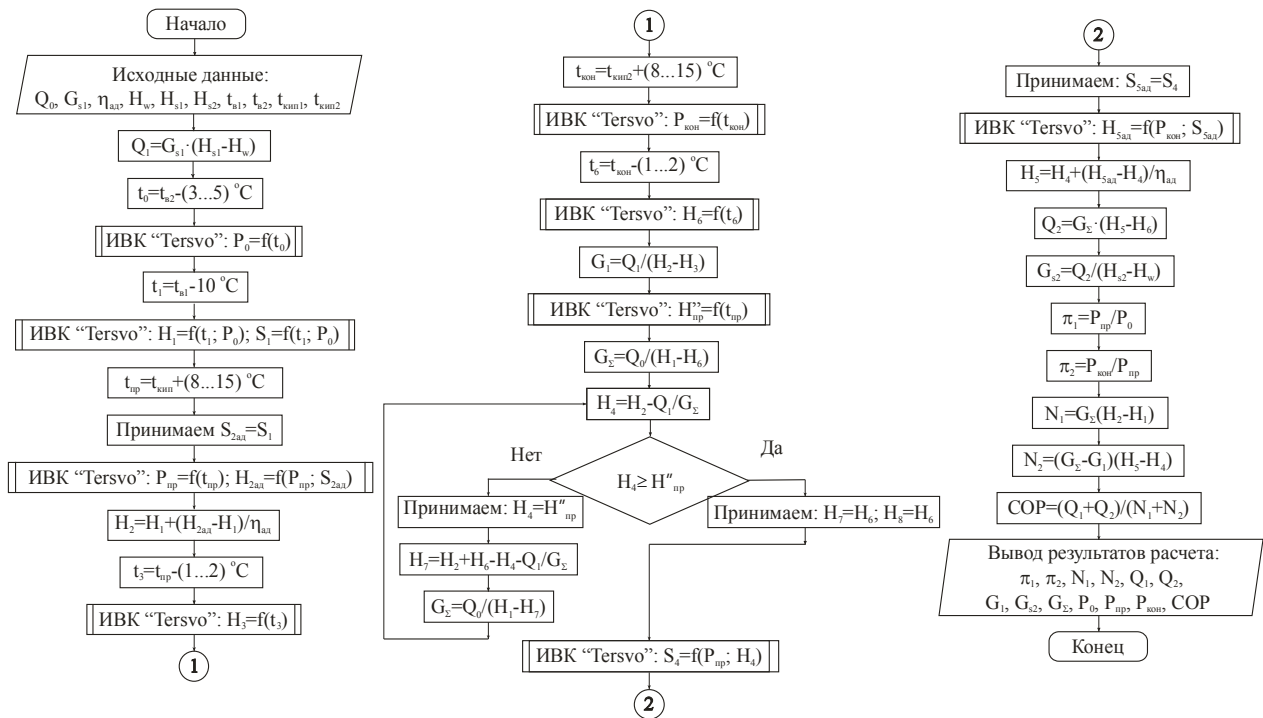


Рис. 2. Блок-схема расчета цикла теплонасосной паропроизводящей установки

При расчете энтальпии пара хладона на всасывании в компрессор обязательно должно выполняться условие $H_4 \geq H''_{пр}$. При невыполнении этого условия принимаем новое значение энтальпии, равное $H_4 = H''_{пр}$.

Для определения конечных параметров при сжатии хладона во второй ступени компрессора также использовалось последовательное приближение по температуре $t_{кон}$ при известном значении давления $P_{кон}$.

Результаты расчета цикла ТНПУ:

- отношение давлений в компрессоре первой и второй ступени, соответственно π_1, π_2 ;
- мощность, затрачиваемая на привод компрессора первой и второй ступени, соответственно N_1, N_2 ;
- тепловая нагрузка на конденсатор первой и второй ступеней Q_1, Q_2 ;
- массовый расход хладона через испаритель G_{Σ} ;
- массовый расход хладона через конденсатор первой и второй ступеней G_1, G_2 ;
- давления кипения, промежуточное и конденсации, соответственно $P_0, P_{пр}, P_{кон}$;
- коэффициент преобразования теплового насоса COP.

Выводы

Учитывая потребность в оптимальном выборе для каждого конкретного случая рабочих парамет-

ров судовой ТНПУ, невозможность установления достоверных стоимостных характеристик элементов ТНПУ, а также необходимость учета экологического воздействия ТНПУ на окружающую среду, разработана компьютерная математическая модель для расчета цикла ТНПУ.

Разработана структура ММ, включающая взаимосвязанные математические модели аппаратов и элементов ТНПУ, а также установлены иерархические связи между этими элементами, что определяет синтез ММ системы и алгоритм её реализации на компьютере.

Литература

1. Schmid, H. *Less Emissions through Waste Heat Recovery [Text]* / H. Schmid // Wartsila Corporation. – April, 2004. – 10 p.
2. *Thermo Efficiency System (TES) for Reduction of Fuel Consumption and CO₂ Emission [Electronic resource]*. – Copenhagen, Denmark : MAN B&W Diesel A/S, 2005. – 12 p. – Access mode: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/thermo-efficiency-system.pdf?sfvrsn=22>. – 10.03.2015.
3. Schmid, H. *Marine technologies for reduced emissions [Text]* / H. Schmid, G. Weisser // Wartsila Corporation. – April, 2005. – 12 p.
4. Андреев, А. А. *Эколого-энергетические аспекты внедрения на судах теплонасосных паропроизводящих установок [Текст]* / А. А. Андреев, И. В. Калинин // Техногенна безпека. – Миколаїв : Вид-во МДГУ ім. П. Могилы, 2007.

– Т. 61, Вип. 48. – С. 46-52.

5. Андреев, А. А. Теплонасосное направление генерирования водяного пара в промышленной энергетике [Текст] / А. А. Андреев // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 4. – С. 73-77.

6. Андреев, А. А. Сравнительная оценка энергетической эффективности судовых паропроизводящих установок различных типов [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калинин // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 2 (413). – С. 100-106.

7. Applied Heat Pump And Heat Recovery Systems [Electronic resource]. – ASHRAE 2000, Systems and Equipment Handbook CD. – Englewood, Colorado. – USA., 2000. – SI Edition, Chapter 8. – P. 1–22. – Access mode: <https://www.ashrae.org/advertising/handbook-cd-commercial-resources/systems/applied-heat-pump-and-heat-recovery-systems>. – 10.03.2015.

8. Оценка эффективности утилизации теп-

лоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками [Текст] / Ю. В. Захаров, А. А. Андреев, И. В. Калинин, В. И. Максимов // Зб. наук. пр. НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 70-79.

9. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок [Текст] / А. А. Андреев, В. С. Самохвалов, Д. Н. Смагин, В. С. Цвиклис // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 5 (283). – С. 66-76.

10. Максимов, В. И. Моделирование термодинамических свойств рабочих речовин холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / В. И. Максимов // Сучасні проблеми суднової енергетики: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – С. 108–109.

Поступила в редакцію 12.05.2015, рассмотрена на редколлегии 18.06.2015

МАТЕМАТИЧНА ТА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЦИКЛА ТЕПЛОНАСОСНОЇ ПАРОВИРОБЛЯЮЧОЇ УСТАНОВКИ

І. В. Калініченко, А. А. Андреев, В. І. Свиридов

Для визначення ефективності теплонасосної паровиробляючої установки була розроблена математична модель комп'ютерного розрахунку її циклу. Для побудови ефективної математичної моделі були визначені першочергові фізичні зв'язки і співвідношення. Встановлено ієрархічні зв'язки між елементами математичної моделі, що визначає синтез всієї системи і алгоритм її реалізації на комп'ютері. Наведено особливості розрахунку і аналізу схеми теплонасосної паровиробляючої установки для одержання водяної пари двох тисків 0,3 і 0,5 МПа.

Ключові слова: теплонасосна паровиробляюча установка, математична модель, блок-схема, генератор пари, проміжна посудина, робочий цикл.

MATHEMATICAL MODEL AND BLOCK-SCHEMA FOR COMPUTER CALCULATION OF THE STEAM SUPPLY HEAT PUMP PLANT CYCLE

I. V. Kalinichenko, A. A. Andreev, V. I. Sviridov

To determine the efficiency of the heat pump steam supply system a mathematical model of computer calculation of its cycle was developed. To build an effective mathematical model the primary physical links and relations have been defined. Hierarchical connection between the elements of the mathematical model that determines the synthesis of the entire system and an algorithm for its implementation with a computer was established. Peculiarities of calculation and analysis of steam supply heat pump plant schema for generation of the steam of two pressures of 0.3 and 0.5 MPa were presented.

Keywords: steam supply heat pump plant, mathematical model, block-schema, steam generator, intermediate vessel, working cycle.

Калініченко Іван Владимирович – преподаватель кафедры теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина, e-mail: kalinichenkoi80@ukr.net.

Андреев Артем Андреевич – канд. техн. наук, и.о. доцента кафедры теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина, e-mail: artem_andreev@ukr.net.

Свиридов Вячеслав Иванович – канд. техн. наук, и.о. доцента кафедры судового машиностроения и энергетики, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина, e-mail: sviridov51@mail.ru.