

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

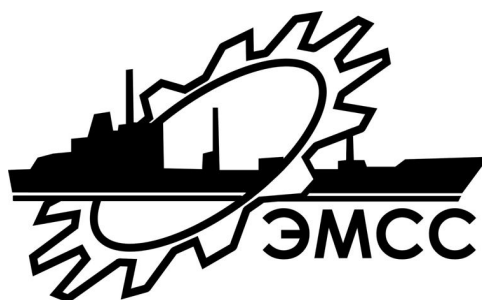


**Изучение тепловых схем и характеристик
паротурбинных установок специализированных судов**

**Методические указания
к выполнению практических занятий №1,2,3
по учебной дисциплине**

**«Техническая эксплуатация ЭУ
специализированных судов»**

для студентов и магистрантов
специальности 7.100302, 8.100302
“Эксплуатация судовых энергетических установок”
специализации 7.100302.03, 8.100302.03 “Эксплуатация
энергетических установок специализированных судов”
дневной и заочной форм обучения



Севастополь
2008



Изучение тепловых схем и характеристик паротурбинных установок специализированных судов Методические указания к проведению практических занятий №1,2,3 по дисциплине “Техническая эксплуатация ЭУ специализированных судов” для студентов и магистрантов специальности 7.1003020, 8.100302 “Эксплуатация судовых энергетических установок” специализации 7.100302.03, 8.100302.03 “Эксплуатация судовых энергетических установок специализированных судов” дневной и заочной форм обучения /Сост. В.Н. Литошенко, Г.Б. Лыкова. –Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – 20 с.

Целью методических указаний является изучение характеристик и состава тепловых схем судовых паротурбинных установок и типового включения элементов в тепловую схему; закрепление теоретических знаний студентов и магистрантов специальности 7.1003020, 8.100302 “Эксплуатация судовых энергетических установок” специализации 7.100302.03, 8.100302.03 “Эксплуатация судовых энергетических установок специализированных судов” по дисциплине “Техническая эксплуатация ЭУ специализированных судов” в обеспечение разделов ПДНВ 78/95 А/2 и А/3.

Методические указания утверждены на заседании кафедры эксплуатации морских судов и сооружений, протокол № __ от __.12.2008 г.

Рецензент: Мальчиков А.И., канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений и сокращений	
Введение	
1. Теоретическая часть	
2. Тепловые схемы и характеристики ПТУ сухогруза “Ленинский Комсомол” типа ТС–1 и пассажирского лайнера “Максим Горь- кий”	
3. Тепловые схемы и характеристики ПТУ танкеров “Пекин”, “София”, “Мир”	
4. Тепловые схемы и характеристики современных ПТУ без проме- жуточного перегрева пара	
5. Тепловые схемы и характеристики современных СПТУ с проме- жуточным перегревом пара	
6. Характеристики тепловых схем ПТУ углевозов	
Заключение	
Вопросы для самопроверки знаний	
Библиографический список	

Перечень условных обозначений и сокращений

m – число ступеней регенеративного подогрева питательной воды;
 N_e – эффективная мощность, кВт;
 $N_{ТГ}$ – мощность на клеммах турбогенератора;
 ВК – вспомогательный котёл;
 ВКН – вспомогательный конденсатный насос;
 ВХ – вспомогательный конденсатор;
 ВЦН – вспомогательный циркуляционный насос;
 ГК – главный котёл;
 ГМН – главный масляный насос;
 ГН – грузовой насос;
 ГПН – главный питательный насос;
 ГТЗА – главный турбозубчатый агрегат;
 ГТН – главный топливный насос;
 ГХ – главный конденсатор;
 ГЦН – главный циркуляционный насос;
 Д – деаэратор;
 ДН – дренажный насос;
 ЗН – зачистной насос;
 ИГК(ПГНД) – испаритель грязных конденсатов(парогенератор низкого давления);
 ИКВ(ИС) – испаритель котельной воды;
 МО – маслоохладитель;
 ПВД – подогреватель питательной воды высокого давления;
 ПНД – подогреватель питательной воды низкого давления;
 ПП – промежуточный перегрев пара;
 ППП – промежуточный пароперегреватель;
 SGK – сборник горячих конденсатов;
 СГУТ – система глубокой утилизации теплоты;
 СУУ – система укупорки уплотнений;
 ТВД – турбина высокого давления;
 ТГ – турбогенератор;
 ТКС – топка с кипящим слоем;
 ТНД – турбина низкого давления.

ВВЕДЕНИЕ

Период широкого использования ПТУ на всех типах судов закончился в XX столетии и в настоящее время нишей использования ПТУ являются корабли, САЭУ, танкеры, метановозы, углевозы и СГУТ. При эффективных мощностях СЭУ более 25...30 МВт, ПТУ отличается меньшими массогабаритными характеристиками чем ДВС и не требует установки мощных вспомогательных котлов при больших потребностях в паре (например, для танкеров).

Развитие современных ПТУ связано с увеличением их эффективности, повышением начальных параметров пара и использованием в качестве топлива каменного угля.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Области использования и перспективы повышения экономичности ПТУ на современных судах.

Успешное применение в СДВС высоковязких высокосернистых топлив типа IF-230(M-40) лишило СПТУ монополии на их использование и нацелило на использование каменного угля и других дешёвых топлив.

Тепловые схемы современных СПТУ выполняются регенеративными с числом подогревателей питательной воды $m=3...6$ и скользящим переключением регенеративных отборов при уменьшении нагрузки ГТЗА.

Высокая манёвренность СПТУ ограничивает использование для трубок пароперегревателей паровых котлов сталей аустенитного класса топками с кипящим слоем для каменного угля и перегревом пара до 650°C . А использование для котлов сталей перлитного класса, хорошо работающих при манёврах, ограничивается температурой перегретого пара 520°C .

Вторичный перегрев пара имеет аналогичные ограничения

Начальное давление перегретого пара ограничено допустимой конечной влажностью $<12\%$, парциальностью и минимальной высотой лопаток регулировочной ступени ТВД и пока не превышает для СПТУ с промежуточным перегревом пара 17,0 МПа.

Тепловые схемы СПТУ предусматривают утилизацию теплоты с конденсацией пара, отработавшего в противодавленческих ВТ, ИУ, СУУ. Подогреватели питательной воды имеют секцию снятия перегрева и охлаждения конденсата и включены по конденсату греющего пара каскадно. Для подогрева конденсата используется теплота охлаждения смазывающего масла, чтобы снизить тепловые потери. В ущерб надёжности, в некоторых тепловых схемах отказываются от ИГК.

Увеличение экономичности ВТ предусматривает блочные приводы генераторов и ГПН или “навешивает” их на ГТЗА. Главные конденсаторы выполняются самопроточными.

Настоящие МУ посвящены изучению влияния перечисленных мероприятий на экономичность СПТУ.

2. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТУ СУХОГРУЗА “ЛЕНИНСКИЙ КОМСОМОЛ” ТИПА ТС–1 И ПАССАЖИРСКОГО ЛАЙНЕРА “МАКСИМ ГОРЬКИЙ”

Совместными усилиями ЦКБ “Балтсудопроект”, СКБК, Кировского и Балтийского заводов в 50-ых годах прошлого столетия была разработана и построена первая отечественная СПТУ типа ТС–1 для большегрузного сухогруза “Ленинский Комсомол” (рисунок 1).

Для этого времени начальные параметры пара 470 °С и 4,2 МПа для сухогруза водоизмещением 22000 т и эффективной мощностью 9650 кВт при 100об/мин гребного ВФШ считались высокими.

Для удобства анализа принимаем тепловую схему ТС–1 за базовую и тщательно изучим её состав.

ПТУ оснащено 2-мя водотрубными главными котлами типа КВГ–25 паропроизводительностью по 25 т/ч с суммарной поверхностью нагрева 408 м² [1].

Котёл оборудован экономайзером 37, пароперегревателем 6, парохладителем 4, вентилятором 3 и газовым воздухоподогревателем 2. Топливная система котлов снабжена расходной цистерной котельного топлива 42, ФГО И ФТО (44), топливоподогревателем 43, и форсуночным топливным насосом 41.

После ТНД пар конденсируется в главном конденсаторе (ГХ) 16, который прокачивается забортной водой главным циркуляционным насосом (ГЦН) 17. Конденсат из ГХ откачивается главным конденсатным насосом (ГКН) 18 и последовательно прокачивается через холодильники главных эжекторов (ГЭ) 19, отсасывающих из ГХ паровоздушную смесь, эжектор 20 и конденсатор 22 испарительной установки 24, эжектор и конденсатор системы укупорки уплотнений пара 23. Все эжекторы работают на охлаждённом дросселированном паре, давлением 0,13 МПа. Конденсат из ступеней ГЭ отводится в ГХ через U-образные гидрозатворы.

Система регенерации ПТУ 3-х ступенчатая $m=3$. Подогреватель низкого давления (ПНД) 28 – условно-смесительного типа, т.к. конденсат греющего пара 1-го отбора (25) стекает в цистерну горячих конденсатов (СГК) 21, и оттуда дренажным насосом (ДН) 26 закачивается в деаэра-тор (Д) 29. На паре первого отбора работает также ИУ 24.

Второй смесительной ступенью регенеративного подогрева питательной воды является деаэратор (29), работающий на паре II-го отбора(30) из ресивера между ТВД и ТНД и отработавшем паре турбопривода главного питательного насоса (ГПН) 39, который работает на охлаждённом паре 5. Паро-воздушная смесь из деаэрирующей головки направляется в конденсатор выпара, расположенном на конденсаторопроводе перед деаэратором.

Третий регенеративный подогреватель питательной воды высокого давления(ПВД) 40 работает на паре III-го отбора из ТВД, а конденсат греющего пара отводится в деаэратор.

Для исключения загрязнения питательной воды нефтепродуктами в подогревателях топлива и масла испаритель грязных конденсатов (ИГК) 31 выделен в автономный контур. Его иногда называют подогревателем низкого давления (ПГНД). Он работает на паре III-го отбора из ТВД или на охлаждённом паре.

Турбогенератор (ТГ) 7 работает на свежем перегретом паре как и ГТЗА и сбрасывает отработавший пар во вспомогательный конденсатор(ВХ) 34, а конденсат подаётся в главный конденсаторопровод за охладителем эжектора ИУ.

ИУ 2-х ступенчатая, вакуумная, приспособленная работать и на стоянке на охлаждённом паре при охлаждении её конденсатора и эжектора заборной водой.

Для лучшего усвоения материала студентам предлагается самостоятельно изучить тепловую схему ТС–1 с нанесёнными параметрами конденсата и пара (рисунок 2).

При работе ГТЗА на максимальном режиме потребители отборов переключаются на охлаждённый пар.

На малых нагрузках испарители, деаэратор и водоподогреватели также переключаются на охлаждённый редуцированный пар из котла.

Эффективный удельный расход топлива равен $337,3 \text{ гр}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

Тепловая схема ПТУ пассажирского лайнера “Максим Горький” (“Фёдор Шаляпин”), рисунок 3, аналогична тепловой схеме ТС–1.

Турбопривод ГЦН и ГПН сбрасывает пар во II-й отбор на деаэратор.

Воздухоподогреватели ГК – паровые, также питаются паром II-го отбора.

ИУ 4-х ступенчатая, проточная адиабатного типа производительностью $4 \times 100 \text{ т/сутки}$, работает на паре III-го отбора или на насыщенном паре.

СПТУ построено в ФРГ фирмой АЕГ $N_e = 2 \cdot 7350 \text{ кВт}$ при $n_{\text{вфш}} = 130 \text{ об/мин}$. Начальные параметры пара выше чем в ТС–1 – $5,89 \text{ МПа}$, $510 \text{ }^\circ\text{C}$, $m=3$, удельный эффективный расход топлива $365 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

ПТУ 2-х вальная, обеспечивается паром из 3-х ГК, для обеспечения большей живучести. ТЗХ обеспечивается насыщенным паром.

3. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТУ ТАНКЕРОВ “ПЕКИН”, “СОФИЯ”, “МИР”

Второй серийной отечественной ПТУ типа ТС–2 были оснащены сначала танкер “Пекин” $D=39900$ т, а далее “София” $D=62000$ т мощностью 13,97 МВт с 2-мя ГК типа КВГ–34 (34т/ч) $\eta_k=93$ % с паровым воздухоподогревателем.

Тепловая схема аналогична ТС–1 (рисунок 4), имеет 2 ступени регенеративного подогрева питательной воды $m=2$ и следующие характеристики:

$\eta_e=26,5$;	$N_e=13,97$ МВт, ВФШ, 110 об/мин;
$b_e=326,4$ гр/(кВт·ч);	$N_e^{max}=15,386$ МВт, 113 об/мин;
$P_k=43,1$ МПа;	$P_{Iотб}=0,872$ МПа;
$t_{пе}=470$ °С;	$P_{Iотб}=0,078$ МПа;
$t_l=465$ °С;	

На режиме заднего хода $t_{пе}=400$ °С. Подогрев воздуха до 90...100 °С.

Для тренировки студентам предлагается самостоятельно разобрать тепловую схему ТС–2 с величинами потоков и параметрами пара (рисунок 5).

Танкер японской постройки “Мир” $DW=40715$ т, мощностью 11,764 МВт при 102 об/мин. Тепловая схема содержит 2 ГК с газовыми экономайзерами и паровыми воздухоподогревателями, автоматизированными пароохладителями, которые генерируют пар давлением 4,24 МПа температурой 450 °С, охлаждённый пар температурой 250 °С при $\eta_k=92,5$ %. Котлы оборудованы САУ питания, горения и перегрева пара. Перегретый пар используется в ГТЗА и ТГ, а охлаждённый – палубными механизмами, ГПН, ГН и подогревателями.

От ГТЗ отводится 3 отбора: 0,09 МПа; 0,4 МПа и 1,2 МПа. Пар III-го отбора используется в ИГК, пар II-го отбора – в деаэраторе и воздухоподогревателе, пар I-го отбора в ПНД и ИКВ. Температура питательной воды равна 125 °С. Тепловая схема ПТО танкера “Мир” представлена на рисунке 6.

4. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ПТУ БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

Признанным лидером в создании морских турбинных установок является фирма “General Electric” США, по лицензиям которых выпускается большая часть ПТУ в мире.



Разберём тепловую схему СПТУ типа MST–13 для танкера эффективной мощностью 13,6 МВт с ВФШ (рисунок 7).

Турбоход оснащён 2-мя ГК с пароохладителями впрыскивающего типа с параметрами пара 6,06 МПа и 515 °С.

Тепловая схема регенеративная с числом подогревателей питательной воды $m=5$: 2 ПНД (20 и 21) – условно смесительные с SGK (25) и дренажным насосом(на схеме не указан); деаэратором – подогревателем смесительного типа (22) и 2-мя ПВД (10 и 11) – поверхностного типа.

Автономные ТГ(2), ГПН (19), ГН и ЗН (9), насосы мойки танков (24), бытовые потребители (4, 5), подогреватели мытьевой воды танков(24) работают на охлаждённом паре. Палубные механизмы (17), подогреватели груза (22), топливоподогреватели (26) работают на охлаждённом паре после вторичного пароохладителя впрыскивающего типа.

После подогревателя нефтепродуктов (22, 26) установлены очистители конденсата.

На вспомогательный атмосферный конденсатор (18) работает стояночный ТГ (13), ГН и ЗН (9), подогреватели мытьевой воды танков (14), палубные механизмы (17). ИГК в тепловой схеме отсутствует.

ИУ испарительной установки работает на паре II-го отбора из ТНД. ГХ выполнен самопроточным.

На ГХ и ИУ вместо эжекторов для отсоса паровоздушной смеси установлены эксгаустеры (7) с последующим конденсатором (16). На конденсаторопроводе перед Д установлен конденсатор выпара (15).

Вместо традиционного подвального расположения ГХ под ТНД(смотри рисунок 1) применена бесподвальная компоновка ГТЗА с осевым выхлопом пара из ТНД в ГХ, расположенный в нос от ГТЗА (рисунки 14 и 15). Это позволяет расположить ГТЗА под ГК.

Габариты редуктора удалось снизить за счёт использования планетарных ступеней и увеличения числа потока мощности.

Сравнение ГТЗА типа ТС–2 и MST–13 с почти равными N_e , соответственно 13,95 и 13,6 МВт показало, что за счёт увеличения начальных параметров пара, соответственно, 4,2 МПа и 470 °С до 6,06 МПа и 515 °С, увеличение числа регенеративных подогревателей питательной воды m с 2-х до 5-ти; осевого выхлопа пара в ГХ с самопроточной циркуляцией, позволило увеличить эффективный КПД с 26,5 до 28,4 % и снизить удельный эффективный расход топлива ($Q^p_n=41680$ кДж/кг) с 0,3373 до 0,303 кг/(кВт·ч).

На рисунке 8 изображена тепловая схема ПТУ танкера “Торсхаммер” $N_e=23,48$ МВт с одновальной ГТЗА “General Electric” США, который отличается от MST–13:

- наличием ПГНД(18) и контура “грязных конденсатов”;
- вместо эксгаустера установлен ГЭ;

- ПВД имеет секции снятия перегрева греющего пара(19,20);
- на малых нагрузках вместо пара V-го отбора используется охлажденный пар и имеется клапан стравливания его избытка в ГХ(12).

Для голландского контейнеровоза построена СПТУ типа MST–19, $N_e=2.44,0$ МВт и параметрами пара 5,81 МПа, 510 °С, $m=2$, $b_e=290$ гр/(кВт·ч).

СПТУ типа MST–21 (рисунок 9) предназначенная для диапазона мощностей $N_e=6,6...14,0$ МВт состоит из 2-х ГК с параметрами пара 5,9 МПа, 510 °С без промперегрева. ГК с 2-мя экономайзерами, между которыми включён ПВД IV, что обеспечивает постоянство температуры уходящих газов и с помощью ПВД – увеличение температуры питательной воды, что эквивалентно снижению удельного эффективного расхода топлива на 3 %.

Для обеспечения достаточной экономичности на долевых нагрузках предусмотрена каскадная схема переключения ПНД на паротбор более высокого давления; использован паровой воздухоподогреватель. ТГ работает на свежем перегретом паре на ГХ. ГПН работает также на свежем перегретом паре на Д.

Тепловая схема обеспечивает при $N_e=6,6$ МВт удельный эффективный расход топлива 304 гр/(кВт·ч).

В таблице 1 представлены изменения удельного эффективного расхода топлива в % в зависимости от мероприятия.

Таблица 4.1 – Зависимость расхода топлива от мероприятий.

Мероприятия	Расход топлива в %
Понижение оборотов винта	3 % на 10 об/мин
Привод генератора от ГТЗА	1,5...3 % в зависимости от N_e
Привод генератора и ГПН от ГТЗА	2...4 % в зависимости от N_e
Промежуточный перегрев пара	4...5 % в зависимости от N_e
Единый термодинамический цикл в 2-хвальной ПТУ	4...5 % в зависимости от N_e
Снижение P_x	при 0,5...1 % с 0,0051 до 0,0045 МПа
Применение регулируемого газо-воздухоподогревателя	0,5...1 %
Повышение P_k до 6.3 МПа	0,2...0,4 %
Охлаждение МО конденсатом	0,5

Современные ПТУ ограниченные мощностью выполняются без промежуточного перегрева пара с $m=4$, каскадной системой переключения отборов при уменьшении нагрузки(смотри тепловую схемы MST–21 рисунок 9).

Шведская фирма “Сталь Лаваль” по лицензии фирмы “General Electric” США, разработало мощностной ряд СПТУ, параметры которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики СПТУ фирмы “Сталь Лаваль”

Параметры	Без промперегрева			С промперегревом	
	3В	4В	5В	5BR	5MR
Начальное давление перегретого пара, МПа	6,42	6,42	8,2	10,3	10,3
Начальная температура перегретого пара, °С	513	513	513	513	541
Давление перегретого пара за вторичным пароперегревателем, МПа	-	-	-	2,76	2,76
Температура перегретого пара за вторичным пароперегревателем, °С	-	-	-	513	541
Температура питательной воды, °С	142	194	209	221	221
Температура уходящих газов, °С	167	130	130	130	116
КПД котла	0,883	0,9	0,9	0,9	0,907
Давление пара в главном конденсаторе, МПа	0,00509	0,00509	0,00509	0,00509	0,00509
Число ПВД	-	1	2	2	2
Число ПНД	3	3	3	3	3
Привод Г и ГПН	От общей турбины				От ГТЗ
Охлаждение ИУ	Конденсатом				
Охлаждение МО	Забортной водой				конденсат
Удаление паровоздушной смеси из ГХ	Эжектором				Экспаустером
Циркуляционная система ГХ	Самопроточная				
Термодинамический КПД	0,308	0,316	0,322	0,338	0,352
Удельный расход топлива	0,272	0,265	0,260	0,247	0,238

Как видно из таблицы 2 увеличение эффективности ПТУ связано с:

- увеличением начальных параметров пара;
- промежуточным перегревом пара;
- увеличением числа подогревателей питательной воды;
- увеличением КПД котла;
- приводом Г и ГПН от ГТЗА;

- охлаждением ИУ конденсатом;
- охлаждением МО конденсатом;
- отсосом пароводяной смеси эксгаустером;
- самопроточной циркуляцией ГХ;
- осевым выхлопом пара из ТНД в ВХ.

На заднем ходу выключается промежуточный перегрев пара и перегретый пар из основного пароперегревателя направляется в ТЗХ.

На рисунках 10, 11 и 12 изображены тепловые схемы типов 3В, 4В и 5ВВ.

Японскими фирмами “Kawasaki” и “Heitachi” разработан мощностной ряд СПТУ типов UA, UB, UR, отличающихся одинаковыми техническими принципами за исключением узлов высокого давления.

Таблица 3 – Характеристики СПТУ

Тип	N_e , МВт	n , об/мин	$t_{пе}$, °С	$t_{пп}$, °С	P_k , МПа	b_e , гр/(кВт·ч)	М
UA	26,5	110...90	510...520	-	3,92...5,9	279	4
UB	36,8	100...80	520	-	5,9...7,85	272	4
UR	36,8	80	520	520	9,8	252	5

В тепловой схеме ГПН работает на паре IV отбора на Д. В ПТУ типа UR кроме промперегрева пара МО охлаждается конденсатом после ГХ.

Используется осевой выхлоп пара из ТНД в ГХ, 3-х поточный редуктор с равномерным распределением нагрузки и автономным главным упорным подшипником.

В тепловых схемах UB и UR генератор навешен на редуктор с разобщительной муфтой.

Фирмой “Kawasaki” разработан СПТУ типа R604 $N_e=29,6$ МВт с параметрами пара 7,14 МПа, 510 °С которые обеспечивают $\eta_e=34,3\%$ и $b_e=236$ гр/(кВт·ч), а также $N_e=60$ МВт с параметрами пара 13,7 МПа, 540 °С и промперегревом 540 °С, который обеспечивает $b_e=230$ гр/(кВт·ч).

5. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ СПТУ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

Промежуточный перегрев пара применяется только для мощных СПТУ, так как громоздкие паропроводы из ТВД к ГК и от ГК к ТСД значительно загромождает МКО. Промежуточный перегрев пара обеспечивает увеличение термического КПД на 4...5% и позволяет увеличить начальное давление пара (для тепловых схем без промподогрева ограничено 4...5 МПа при допустимой конечной влажности пара меньше 12 %). Ограничением величины начального давления являются малые высоты лопаток или малая порциальность в ТВД.

В качестве типовой схемы СПТУ с промежуточным перегревом можно выбрать MST-14 фирмы “General Electric” США (рисунок 13) с одним ГК (1) и фирмы “Фостер Уиллер” с промежуточным пароперегревателем (3), $P_1 = 10,2$ МПа, $t_1 = 510$ °С, $t_{\text{ип}} = 510$ °С, $P_x = 0,0052$ МПа.

Аварийный ход и потребители пара на стоянке обеспечиваются паром ВК. Задний ход обеспечивается ТЗХ на дросселированном перегретом паре. ГПН(7) навешан на ТСД (5) через муфту (6) имеет автономный турбопривод (8) на охлаждённом паре с выхлопом на ГХ (12). Стояночный ГПН работает на охлаждённом паре с выхлопом на деаэратор (25). ТГ(10) навешан на ТНД (11) через муфту (6) и имеет автономный турбопривод (9) на охлаждённом паре с выхлопом на ГХ.

На ГХ (12) вместо главного эжектора установлен эксгаустер (17). Главный конденсаторный насос (13) прокачивает конденсат через маслоохладитель (14), конденсатор испарительной установки (19), из которого паровоздушная смесь откачивается эксгаустером (18); ПНД1 – условно смесительного типа, работает на паре V отбора; конденсатор и эжектор системы укупорки уплотнений (22); ПНД2 – поверхностного типа, работает на паре IV отбора, с отводом конденсата греющего пара и конденсата выпора в деаэратор (25).

Конденсат греющего пара ПНД2 переохлаждается в ПНД1. Конденсат из конденсатора испарительной установки (19) и конденсат системы укупорки уплотнений (22) сбрасывается в атмосферный сборник горячих конденсатов (23), а из него самотёком поступает в ПНД1, откуда дренажным насосом (21) закачивается в главный конденсатопровод перед ПНД2.

Паровоздушная смесь из конденсатора выпора деаэратора сбрасывается в конденсатор испарительной установки (19).

ГПН (7) (на стоянке 26) подаёт питательную воду поверхностной ПВД1 (27) и ПВД2 (28) в экономайзер ГК. ПВД имеют ступени снятия перегрева и переохлаждения конденсата и по ходу конденсата греющего пара включены каскадно на деаэратор.

ПГНД-30 работает на охлаждённом паре через охладитель сточных конденсатов на деаэратор.

Излишки охлаждённого пара через предохранительный клапан (15) могут сбрасываться в ГХ.

Эффективный КПД этой СПТУ составляет $\eta_e = 34,9$ % и удельный эффективный расход топлива $b_e = 243,3$ гр/(кВт·ч).

Отечественные тепловые схемы СПТУ типа ТС-3 супертанкера D=182000 т “Крым”, мощностью 22,06 МВт при 85 об/мин ВФШ (рисунок 16) созданы на основе опыта СПТУ ТС-1, ТС-2, MST-13, MST-14 и др.

В таблице 4 приведены результаты испытаний СПТУ типа ТС-3:

Таблица 4 – Характеристики СПТУ на 2^х режимах

Параметры	Режим 1	Режим 2
Мощность на гребном валу, МВт	22	21,3
Паропроизводительность ГК т/ч	80	81,2
Давление пара, МПа, P_1	7,65	7,35
$P_{\text{пп}}$	1,45	1,415
Температура пара, °C t_1	510 +5/-10	521
$t_{\text{пп}}$	510 +5/-10	492
Температура питательной воды, °C, $t_{\text{пв}}$	239	220
Температура выпускных газов, °C, t_{yx}	120	130
Давление пара в ГХ, МПа	0,0051	0,006
Расход охлаждённого пара, т/ч	-	1,9
Электрическая мощность ТГ	820	900
КПД ГК %	96	96
Эффективный КПД ГТЗА, %	80,7	80
Эффективный удельный расход топлива, при $Q^p_{\text{н}}=41900$ кДж/кг	0,249...0,256	0,262

От MST-14 тепловая схема типа ТС-3 имеет следующие отличия:

- при $m=5$ – один ПНД и три ПВД со ступенями снятия перегрева и переохлаждения конденсата;
- привод ТГ и ГП осуществляется от ТСД с общей автономной приводной турбиной;
- паропроизводительность ВК = 35т/ч;
- мощность ТГ 1350 кВт;
- мощность стояночного ДГ 400 кВт;
- мощность АДГ 200кВт;
- турбоприводы ГН, БН, ЗН – вертикальные;
- ПНД работает на паре IV отбора из ресивера отвода пара на промперегрев.

Характеристики ПТУ с промежуточным перегревом пара типа 5МР шведской фирмы “Сталь Лаваль” представлены в таблице 2, а тепловая схема на рисунке 12. В отличие от тепловой схемы MST-14 она имеет главный эжектор, а не эксгаустер, генератор и ГП приводятся от общего автономного турбопривода, работающего на паре отбора из ТВД.

СПТУ типа R802 японской фирмы “Kawasaki” мощностью 23,5 МВт, $P_1=8,52$ МПа, $t_1=510$ °C, $t_{\text{пп}}=510$ °C, $m=4$, обеспечивает удельный эффективный расход топлива 265 гр/(кВт·ч).

СПТУ типа UR мощностью 36,8 МВт, при 80 об/мин, имеет $t_1=520$ °C, $t_{\text{пп}}=520$ °C, $P_1=9,8$ МПа, $m=5$ и обеспечивает удельный эффективный расход топлива 252 г/(кВт·ч).

6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ПТУ УГЛЕВОЗОВ

Конкуренция паротурбинных и дизельных установок заставляет ведущие турбостроительные фирмы вести энергичные поиски путей повышения эффективности СПТУ:

- внедрение более высоких начальных параметров пара (15...17 МПа, 560...650 °С) с промежуточным перегревом пара;
- многоступенчатый регенеративный подогрев питательной воды ($m=5...6$);
- применение новых материалов и конструкций;
- обеспечение работы ГК на низкосортном топливе (угле);
- сжигание топлива в топках с кипящим слоем (ТКС);
- применение основной и маршевой турбин для частичных нагрузок ;
- совершенствование парогазовых установок и др.

В качестве примера рассмотрим тепловую схему СПТУ с промежуточным подогревом пара типа VAR-79 мощностью 20 МВт, разработанной фирмами “Сталь Лаваль” (Швеция) и “Бабкок и Вилькинс ЛТД” (Англия) на параметры пара $P_k=13,2$ МПа, $t_{пе}=603$ °С, $t_{пп}=603$ °С, выносными основным и промежуточным пароперегревателями с ТКС, $m=5$, привод Г и ГПН от автономных турбоприводов, работающих как на вакуум (ГХ), так и на частичных режимах и стоянке на противодавление (деаэратор), с агрегатной компоновкой оборудования, 3-х корпусной конструкцией ГТЗА (для оптимальной частоты вращения) и планетарной суммирующей выходной ступенью редуктора (рисунок 17). Масса элементов составила: ГХ – 65 %, ТВД и ТСД – 50 %, редуктор – 30 %. Абсолютные масса при мощности 20 МВт: ТВД – 1100 кг, ТСД – 2000 кг, роторов соответственно 140 и 225 кг при длине 12 м.

На ТКС находятся гранулированные инертные материалы (известняк, доломит), которые являются поглотителями верхних вредных примесей. Топливо подаётся в слой разогретых инертных материалов и витает на струях дутьевого воздуха (сжиженная среда) со скоростью 2...4 м/с, что интенсифицирует теплообмен между частицами слоя и трубами, погруженными в кипящий слой, очищает трубки от отложений.

В результате теплообмен излучением увеличивается на 25...35 %, а конвективный теплообмен от слоя к погруженным трубкам в 5...10 раз.

В ТКС (рисунок 19) можно сжигать уголь, кокс, отходы переработки нефти и прочее с размерами кусков 6...25 мм (до 100 мм), а жидкое топливо достаточно подогреть до текучести, а не распыла. Температура горения составляет 750...790 °С, что обеспечивает выход золы в твёрдом состоянии (нет шлакования воздухораспределительных решёток).

На рисунке 18 представлены схемы движения пара и газа в ТКС:

- на переднем ходу перегретый пар в количестве 15,6 кг/сек, давлением 12,7 МПа из котельного пароперегревателя (6) с температурой 500⁰С (меньше температуры высокотемпературной коррозии) направляется в выносной основной пароперегреватель (2), погруженный в кипящий слой, перегревается до 603 °С и входит в ТВД (2) с температурой 600 °С. Из ТВД пар, давлением 3 МПа и температурой 406 °С, направляется в выносной промежуточный пароперегреватель в количестве 13,8 кг/сек, перегревается в нём до 603 °С и поступает в ТСД (8) с давлением 2,8 МПа и температурой 600 °С и далее в ТНД (9) и ГХ.

На режиме заднего хода прекращается питание выносных пароперегревателей (1 и 2) топливом и паром с одновременной подачей пара из пароперегревателя котла (6) в ТЗХ, смонтированную в корпусе ТНД (9).

ГК (6) шахтного типа с потолочным топочным устройством, с экономайзером и вращающимся регенеративным воздухоподогревателем (5). Теплота газов (850 °С) из выносного пароперегревателя используется в конвективных поверхностях нагрева котла (6) и отводится на подогрев воздуха.

Регенеративные системы содержат $m=5$ ступеней подогрева питательной воды:

- ПНД1 (15) – работающий на паре I отбора из ТНД и ПНД2 (18) – работающий на паре II отбора из ТНД – поверхностные, т.к. ПНД1 используется для переохлаждения конденсата греющего пара ПНД2, а далее конденсат стекает в сборник горячих конденсатов, откуда закачивается дренажным насосом (16) в конденсатопровод перед ПНД1

- деаэратор (20) – смесительная ступень подогрева, работает на выхлопном паре ГПН

- ПВД1 работает на паре IV отбора

- ПВД2 работает на паре V отбора из ресивера перед промежуточным пароперегревателем

- ПГНД работает на паре V отбора

- ТГ и ГПН имеют автономный турбопривод на свежем перегретом паре (без дополнительного перегрева в ТКС) соответственно с выхлопом пара в ГХ или в деаэратор.

Французская фирма “Chantries de L’Atlatigue” совместно с шведской фирмой “Сталь Лаваль” и английской “Бабкок и Вилькинс ЛТД” разработали СПТУ с промежуточным подогревом и ТКС типа 25/230 на угле или мазуте, параметры которой представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики СПТУ с ТКС

Параметры ПТУ	Вариант А	Вариант Б
Эффективная мощность, МВт	25	25
Начальное давление пара, МПа	13,2	13,2
Начальная температура, °С	600	650

Давление промежуточного перегрева пара, МПа	3	3
Температуру пара за выносным промежуточным пароперегревателем, °С	600	650
Давление в ГХ, МПа	0,00498	0,00498
Расход пара, т/ч	74	68
Температура перегрева пара в котле, °С	515	515
Давление пара в котле, МПа	13,85	13,9
КПД котла, %	90,6	90,6
Температура перегретого пара за выносным пароперегревателем, °С	603	650
Температура пара перед пароперегревателем, °С	415	460
Расход пара за выносным пароперегревателем, т/ч, основным	74	68
промежуточным	64,3	60,8
Площадь выносного пароперегревателя, м ² , основного	40	67
промежуточного	57	64,5
Паропроизводительность ВК, т/ч	30	30
Давление пара ВК, МПа	6,07	6,07
Температура пара ВК, °С	320	320
Мощность СЭС, кВт	1000	1000
Паропроизводительность ПГНД, т/ч	1,2	1,2
Производительность опреснительной установки, т/сутки	30	30
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	232	227

Фирма “General Electric” США разработало СПТУ с промежуточным подогревом пара типа MST-23, мощностью 36,8 МВт, давлением пара 17 МПа и температурой 568 °С, $m=6$, обеспечивающая удельный эффективный расход топлива 228 гр/(кВт·ч) для контейнеровоза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение студентами и магистрантами тепловых схем и характеристик СПТУ, приведённых в методическом указании позволит им не только грамотно прочитать любую тепловую схему, но и оценить её экономичность, маневровые качества, и соответствие современным тенденциям развития СПТУ.

Анализ типового включения элементов СПТУ в тепловые схемы развивает в студентах и магистрантах навыки самостоятельного построения тепловых схем в зависимости от назначения и характеристик судна.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ

1. На какие начальные и конечные параметры пара рассчитана тепловая схема ТС-1. Опишите её характеристики.
2. Какая компоновка ГТЗА осуществлена в СПТУ типа ТС-1 и ТС-2?
3. Нарисуйте конденсатную систему ПТУ типа ТС-1.
4. Нарисуйте питательную систему ПТУ типа ТС-1.
5. Нарисуйте схему регенерации ПТУ типа ТС-1. Назовите типы регенеративных подогревателей питательной воды.
6. Чем отличается тепловая схема пассажирского лайнера “Максим Горький” от типовой схемы типа ТС-1?
7. Расскажите о характеристиках ПТУ типа ТС-2.
8. Нарисуйте схему регенеративного подогрева ПТУ типа ТС-2 и дайте определение ПВД, деаэратору и ПНД.
9. Расскажите типовые отличия схемы танкера “Мир” от ТС-2.
10. Зачем нужен испаритель грязных конденсатов (ПГНД)? Как ИГК включён в тепловую схему?
11. Зачем нужен испаритель котельной воды (ИУ)? Как 2-х корпусный ИКВ включён в тепловую схему?
12. Как система укупорки уплотнений включена в тепловую схему?
13. Зачем нужен 3-х ступенчатый главный эжектор? На каком паре работает ГЭ и куда поступает конденсат?
14. Чем отличаются характеристики тепловой схемы MST-13 от ТС-2?
15. Чем отличаются система регенерации тепловой схемы MST-13 от ТС-1?
16. Чем отличается тепловая схема СПТУ танкера “Торсхаммер” от MST-13?
17. Какие мероприятия воплощены в тепловую схему MST-21? Назовите её характеристики.
18. На примере мощностного ряда СПТУ фирмы “Сталь Лаваль” расскажите, как влияют изменение параметров рабочих сред и состава тепловой схемы на её эффективность (3В, 4В, 5В, 5ВR, 5MR).
19. Расскажите о преимуществах бесподвальной компоновки ГТЗА.
20. Что такое самопроточная циркуляция ГХ и как она осуществляется на ходовом режиме и на манёврах?
21. Расскажите о характеристиках ПТУ японских фирм “Heitachi” и “Kawasaki”.
22. Как осуществляется промежуточный перегрев пара и что он обеспечивает? Как изменяется конструкция ГТЗА?

23. Как выбирают параметры промперегрева и как осуществляется задний ход в ПТУ с промежуточным перегревом пара.
24. Расскажите о турбоприводах Г и ГПН, о параметрах пара и приводе от ГТЗА.
25. Как обеспечить регулирование ГПН в блочном приводе?
26. Расскажите о системе регенерации тепловой схемы типа MST-14.
27. Расскажите о характеристиках тепловой схемы типа MST-14.
28. Расскажите об отличиях тепловой схемы ТС-3 от MST-14.
29. Раскройте характеристики тепловой схемы типа ТС-3.
30. Раскройте характеристики СПТУ типа R802 и UR.
31. В каком направлении будет идти развитие СПТУ?
32. Расскажите о характеристиках СПТУ типа VAR-79.
33. Расскажите об особенностях тепловой схемы VAR-79.
34. Расскажите о схеме подачи пара в ПТУ типа VAR-79 на переднем и заднем ходах.
35. Что собой представляет ТКС?
36. Расскажите о характеристиках ТКС.
37. Расскажите о характеристиках ПТУ типа 25/230.
38. Расскажите о характеристиках СПТУ типа MST-23.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергосбережение в судовых энергетических установках: учебное пособие/Г.А.Артёмов, В.П.Волошин, В.П.Жуков, Н.Г. Лебедь. –Николаев: Изд-во НКИ, 1985. –84 с.
2. Судовые энергетические установки: учебное пособие/ Г.А.Артёмов, В.П. Волошин, Ю.В.Захаров, А.Я.Шквар. –Л.: Судостроение, 1987. –480с.
3. Родионов Н.Н. Современные танкеры / Н.Н. Родионов. –Л.: Судостроение, 1988. – 284 с.
4. Судовые паросиловые установки: учебник/ А.С.Ясинский. –М.: Транспорт, 1969. – 192 с.