

12 500 миль, после чего пошло на слом. Вскрытие турбины показало ее хорошее техническое состояние. Опыт эксплуатации подтвердил возможность длительной работы турбин на тяжелых топливах, эффективность принятых схем топливоподготовки и очистки проточных частей.

Первым специально спроектированным судном с ГТУ стало двухвинтовое накатное судно «Адмирал Каллаган» водоизмещением 24 000 т, построенное в 1967 г. в Германии для нужд американского ВМФ. Его главная ЭУ первоначально проектировалась в различных вариантах: с ПТУ и ГТУ. Сравнительный анализ проектов показал, что масса ГТУ оказалась на 50 %, а занимаемый ею объем — на 8 % меньше, чем у ПТУ, что позволяло заметно увеличить грузовместимость судна.

Вначале на «Адмирал Каллаган» установили две турбины авиационного типа FT4A-12 фирмы «Пратт и Уитни» с номинальной мощностью 24 200 кВт, обеспечивавшей скорость хода 26 узлов. Впоследствии их заменили установками компании «Дженерал Электрик» типа LM-2500 мощностью 18 600 кВт. Величина среднего удельного расхода топлива у этих турбин составляла 0,242 кг/(кВт·ч), то есть их эффективный КПД при работе на номинальной мощности был равен 35,4 %. Мощность турбин к гребным винтам фиксированного шага передавалась при помощи двухступенчатого реверс-редуктора. Частота вращения винтов на полном ходу была равна 145 об/мин.

Первым в мире гражданским морским судном, на котором были установлены газовые турбины длительного срока службы, стал построенный в 1968 г. сухогруз «Парижская коммуна» дедевейтом 16 185 т и скоростью хода 18,2 узла. На нем применили установку типа ГТУ-20, состоящую из двух одинаковых двигателей ГТУ-10 мощностью по 4 350 кВт, работавших на общий двухступенчатый редуктор с передаточным числом 57,5. Проектирование установки, схема которой показана на рис. 7.13, началось в 1957 г. В его ходе учитывался опыт, накопленный отечественным паротурбостроением.

Двигатель ГТУ-10 работал по открытому циклу с промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией теплоты газов. Он был выполнен по схеме с разделенным теплоперепадом. ТВД 7 приводила в действие КВД 11, ТНД 6 вращала КНД 5 и через редуктор — ВРШ 1.

Работала установка следующим образом. Воздух от КНД охлаждался в воздухоохладителе 14 и поступал в КВД. После КВД он нагревался в регенераторе 8 до температуры 335 °С и шел в камеру сгорания 10. После ТВД и ТНД газ направлялся в регенератор, где отдавал тепло воздуху и охлаждался до 245 °С, затем он поступал в комбинированный

утилизационный котел производительностью 4,5 т/ч. Полученный пар использовался для работы турбогенератора мощностью 400 кВт.

Двухступенчатые ТВД и ТНД имели диски, охлаждаемые воздухом. Корпус ТВД охлаждался пресной водой. Воздушные компрессоры были выполнены осевыми: КНД шестиступенчатым, КВД — двенадцатиступенчатым. Регенератор пластинчатый, трехходовой по воздуху и одноходовой по газам. Воздухоохладитель с перекрестным током, одноходовой, с оребренными трубами. Запускал установку асинхронный электродвигатель, соединенный с ТВД при помощи гидромуфты.

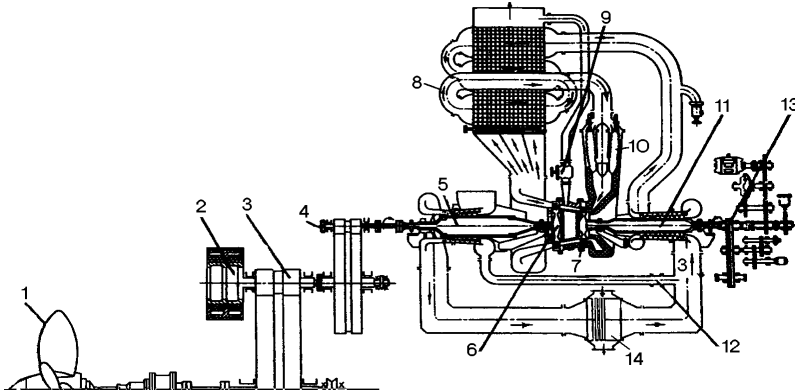


Рис. 7.13. ГТУ сухогруза «Парижская коммуна»:

1 — ВРШ; 2 — соединительная муфта; 3 — редуктор с главным упорным подшипником; 4 — валоповоротное устройство; 5 — КНД; 6 — привод КНД; 7 — ТВД; 8 — регенератор; 9 — клапан перепуска газов; 10 — камера сгорания; 11 — КВД; 12 — клапан перепуска газов; 13 — фланец привода вспомогательных механизмов; 14 — воздухоохладитель

Опытная эксплуатация судна продолжалась в течение 1968—1970 гг. За это время судно прошло 41 800 миль, а установка проработала 2 830 часов. Ее общая наработка, включая стендовые и ходовые испытания, составила: для правой ГТУ 5 670 часов, для левой — 4 818. Во время сдаточных испытаний установка работала на моторном топливе, а во время опытной эксплуатации — на дизельном. Отказов в течение первого года эксплуатации не отмечалось. Маневренные качества судна оказались удовлетворительными [63].

Дальнейшая работа судна показала, что выбранная схема его ЭУ — две главные турбины одинаковой мощности, работающие через общий редуктор на один ВРШ, — оказалась оптимальной. В течение двадцати

лет не было ни одного случая отказа ее в рейсе. Однако эксплуатация судна, построенного в единственном экземпляре, затруднялась сложностью приобретения запасных частей [67].

В середине 1960-х гг. ГТУ малой и средней мощности нашли широкое применение на быстроходных отечественных судах. Пассажирские суда на подводных крыльях типа «Буревестник» и воздушной подушке типа «Сормович» снабжались одновальными двигателями АИ-20. Первое судно типа «Буревестник» построили в 1967 г., первый «Сормович» сдали в эксплуатацию в 1965 г. В качестве движителей на них использовались водометы и воздушные винты.

Двигатель АИ-20, рис. 7.14, относился к авиационному типу. Его номинальная мощность составляла 2 750 кВт при частоте вращения 12 300 об/мин. Удельный расход топлива на режиме номинальной мощности был равен 0,34 кг/(кВт·ч) и соответствовал эффективному КПД 25 %. Трехступенчатая газовая турбина вращала вал с десятиступенчатым осевым компрессором. От этого же вала производился отбор мощности. Двигатель работал на дизельном топливе, он пускался электростартер. Вес двигателя со всеми агрегатами составлял 1 080 кг, его ресурс был равен 2 000 ч. В состав ЭУ, кроме главного, входили вспомогательные газотурбинные двигатели, приводившие в действие электрогенераторы [77].

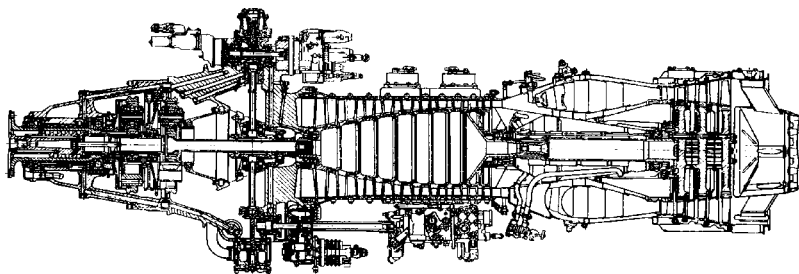


Рис. 7.14. Газотурбинный двигатель типа АИ-20

До середины 1960-х гг. судовые ГТУ развивались относительно медленно. Суммарная мощность установок, специально сконструированных как судовые, в этот период составляла около 3 % общей мощности СЭУ (без учета ГТУ авиационного типа). Значительный рост мощности судовых ГТУ стал прослеживаться с 1965 г., рис. 7.15. В 1971 г. их мощность удвоилась, достигла 6 % от суммарной эксплуатирующихся СЭУ, и равнялась 3 800 МВт. К середине 1980-х гг. в составе мирового торгового флота находилось более 25 судов дедвейтом свыше 2 000 т, оборудованных ГТУ.

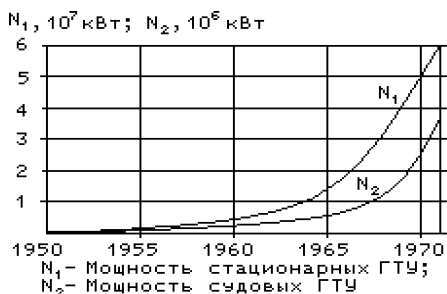


Рис. 7.15. Характер изменения суммарной мощности судовых ГТУ

Изменение параметров судовых ГТУ в период 1950—1968 гг. можно проследить на примере двигателей серии MS, построенных американской фирмой «Дженерал Электрик», табл. 7.1. Начальная температура газа в установках семейства MS за это время выросла на 19,5 %, а их эффективный КПД увеличился с 22 до 32 %, то есть почти в полтора раза.

Таблица 7.1

Параметр	1950 г.	1953 г.	1959 г.	1963 г.	1965 г.	1968 г.
Мощность, кВт	3 680	4 200	5 600	6 250	6 700	8 100
Температура газа, °С	780	780	815	850	880	925

Экономичность и надежность ГТУ в большой степени зависят от начальной температуры газа. В 1950-х и 1960-х гг. она составляла, в среднем, 650—750 °С и не превышала 800 °С. К 1970-м гг. температура газа достигла 900—1 000 °С, а в 1980-х гг. ее значение приблизилось к 1 100 °С. Следует ожидать, что после появления доступных материалов, способных длительное время выдерживать действие высоких тепловых и механических нагрузок, экономичность ГТУ будет резко увеличена. Это позволяет рассматривать этот тип двигателя как перспективный для использования на транспорте, в том числе, морском.

#### 7.4. СУДОВЫЕ ГТУ В 1970—1980-х гг.

С начала 1970-х гг. газотурбинные установки стали использоваться в качестве главных двигателей для быстроходных транспортных и пассажирских судов. В 1971 г. в Германии был построен контейнеровоз «Евролайнер», ставший головным в серии из четырех судов. Контейнеровоз дедвейтом 27 900 т был оборудован двухвальной ГТУ мощностью 22 200 кВт, позволявшей развивать ему скорость хода 26 узлов. В 1977 г. в Финляндии начал эксплуатироваться паром «Финнджет», снабженный ГТУ мощностью 55 200 кВт, обеспечивавшей ему

скорость хода до 30,5 узлов. На этих судах были установлены турбины типов FT4A и FT4C. Они относились к авиационному типу и работали на легком топливе без регенерации теплоты. Основным недостатком этих установок являлась недостаточная экономичность.

Более экономичная установка с ТУК была использована на австралийском ролкере «Айрон монарх», построенном в 1973 г. Судно длиной 173 м и дедвейтом 14 400 т оборудовали одновалной ГТУ длительного срока службы типа MS5112R с мощностью 12 850 кВт [3].

В течение 1979—1987 гг. в эксплуатацию были сданы четыре отечественных газотурбинных ролкера типа «Капитан Смирнов» с установками М25, имеющими глубокую утилизацию тепла. Двухвальные суда дедвейтом 20 000 т при суммарной мощности ЭУ 36 800 кВт развивали скорость хода до 25 узлов при частоте вращения гребных винтов фиксированного шага 130 об/мин.

В состав установки М25 входили два газотурбинных двигателя ДИ59 авиационного типа, рис. 7.16. Они имели в своем составе реверсивную турбину, позволявшую судну маневрировать без использования реверс-редуктора или винта регулируемого шага. Включение в состав установки ТУК позволило увеличить ее мощность на 23 % и снизить удельный расход топлива на 20 %.

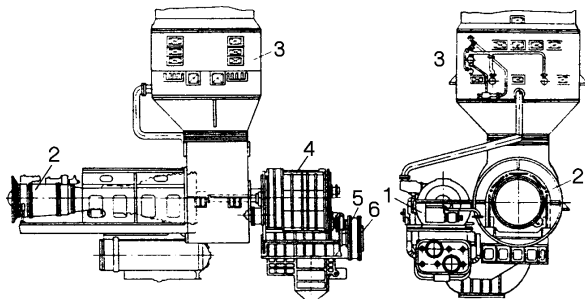


Рис. 7.16. Двигатель ДИ59

Газотурбинный двигатель был сконструирован по схеме «вал в валу», рис. 7.17. Газы из камеры сгорания 15 поступали вначале в ТВД 16, приводившую в действие КВД 14, затем в ТСД 17, вращавшую КНД 13, и в силовую ТНД 18, обеспечивавшую движение судна. ТНД работала на редуктор 3, общий с пропульсивной паровой турбиной 2. Уходящие газы направлялись в утилизационный котел 5, последовательно проходили пароперегреватель 6, испаритель 7 и экономайзер 8 и отводились в атмосферу.

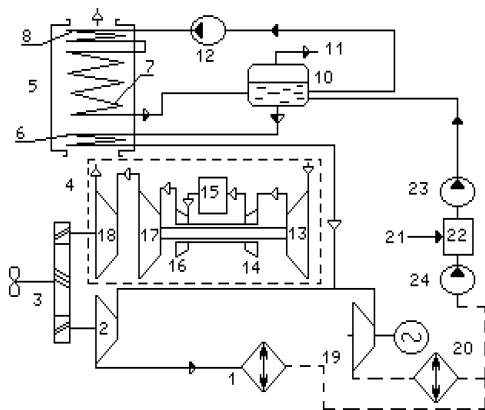


Рис. 7.17. Схема ГТУ ролкера «Капитан Смирнов»:

1 — паровая пропульсивная турбина с конденсатором; 2 — двигатель ДИ59; 3 — утилизационный котел КУП-3100; 4 — редуктор; 5 — муфта; 6 — фланец отбора мощности

Перегретый пар с давлением 1,17 МПа и температурой 310 °С, вырабатываемый утилизационным котлом, использовался в пропульсивной паровой турбине 2 и турбогенераторе 19. Производительность котла по перегретому пару достигала 24 т/ч. Насыщенный пар в количестве 2 т/ч направлялся от сепаратора пара по трубопроводу 11 к общесудовым потребителям. Отработавший пар из пропульсивной турбины и турбогенератора поступал в конденсаторы 1 и 20, откуда конденсатный насос 24 перекачивал образовавшийся конденсат в теплый ящик 22. Сюда же по линии 21 подводился конденсат отработавшего пара от общесудовых потребителей. Насосом 23 питательная вода из теплового ящика подавалась в сепаратор 10, откуда циркуляционным насосом 12 нагнеталась в экономайзер утилизационного котла 8.

Пропульсивная паровая турбина 2, работавшая на винт, потребляла в течение часа 18 т пара с давлением 1,12 МПа. Остальной перегретый пар шел в турбогенератор. Мощность пропульсивной турбины на полной нагрузке достигала 4 250 кВт, то есть 23 % от полной мощности газовой турбины. Расчетный удельный расход топлива составлял 0,231 кг/(кВт·ч) и соответствовал эффективному КПД 38 %.

Анализ технико-экономических характеристик данной установки показал, что они могли быть улучшены в том случае, если бы судно проектировалось на достижение скорости хода не 25 узлов, а 20. Это позволило бы снизить мощность газовых турбин. Замена газо-

турбинного реверса на ВРШ также могла уменьшить расход топлива на 7—8 %. В ходе эксплуатации судов типа «Капитан Смирнов» наблюдались отказы, требовавшие замены двигателей. Они были вызваны повреждениями подшипников и разрушением лопаток турбин из-за вибрации. Замена двигателей резервными занимала всего 48 часов [31].

Характеристики судовых ГТУ 1970-х гг. приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Параметры	Тип установки					
	без регенерации теплоты			с регенерацией теплоты		
	FT4C-2, США	M2500, США	RB-211, Англия	M5002R, США	ГТУ-20, СССР	M-25, СССР
Мощность, МВт	28,5	18,5	20	16—22	9,6	18,5
Температура газа, °С	1 100	1 100	925	750	870	980
Расход топлива, кг/(кВт·ч)	0,28	0,246	0,25	0,266	0,307	0,231
Габариты, м:						
— длина	8,75	6,26	9,89	14,7	12,2	12,2
— ширина	22,4	22,4	2,97	8,4	10,4	5,5
— высота	2,54	2,13	3,86	7,5	7,5	10,8

Одной из последних отечественных разработок в области судовых ГТУ является созданный в конце 1980-х гг. двигатель М37, предназначенный для быстроходных судов на воздушной подушке и подводных крыльях. Его мощность составляет 5 880 кВт при частоте вращения гребного винта 860 об/мин, что позволяет обеспечивать судам скорость хода до 42 узлов. Максимальная температура газов перед турбиной достигает 985 °С, удельный расход топлива равен 0,295 кг/(кВт·ч). Масса установки равна 7 т, расчетный срок ее службы до капитального ремонта должен составлять 8 000 часов.

На развитие судовых ГТУ сильное влияние оказал быстрый рост стоимости судовых топлив, пришедшийся на начало 1970-х гг. После нескольких лет успешной эксплуатации началось их переоборудование в дизельные. Оно коснулось контейнеровозов «Евролайнер», на которые взамен газовых турбин установили четырехтактные СОД типа ТМ620 голландской фирмы «Сторк-Веркспур» мощностью 11 500 кВт при частоте вращения 425 об/мин. Мощность ЭУ контейнеровоза уменьшилась почти вдвое, а скорость хода снизилась до 21 узла. У дизеля ТМ620 расход топлива оказался на 46 % ниже, чем у ГТУ.

Модернизация парома «Финнджет», выполненная в 1981 г., заключалась в дооборудовании его ЭУ дизель-электрической установкой, состоявшей из машин фирмы «Вяртсиля Дизел» типа 18V32, синхронных генераторов и двух гребных электродвигателей мощностью 5 300 кВт. Электродвигатели соединили с редуктором ГТУ. Скорость хода судна под дизель-электрической установкой составляет около 19 узлов (вместо первоначальных 30,5). Проведенные мероприятия позволили снизить расход топлива на 50 % [36].

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в ходе совершенствования конструкций ГТУ, в настоящее время их использование на судах гражданского назначения ограничено. Это, в первую очередь, связано с тем, что экономичность даже самых лучших газовых турбин значительно уступает экономичности МОД и СОД. Их эффективный КПД не превышает 32—37 % против 45—52 % у дизелей. В настоящее время затраты на топливо достигают 60 и более процентов всех эксплуатационных расходов по судну. Поэтому существующие типы ГТУ являются неконкурентоспособными по сравнению с дизелями. Основной областью их использования являются военные корабли.

В качестве перспективной рассматривается одновальная ГТУ, приводящая в действие валогенератор и винт регулируемого шага, вращающийся с частотой 80—120 об/мин, оборудованная системой глубокой утилизации тепла. Начальная температура газа в такой установке должна составлять не ниже 1 100—1 150 °С. Считается, что задача создания судовой ГТУ с КПД 42—44 % является реальной, так как в стационарных установках уже сейчас достигнут КПД 48 %. Одним из направлений проводимых исследований является разработка керамических и металлокерамических материалов для изготовления элементов проточных частей и камер сгорания. Это позволит увеличить начальную температуру газа и срок службы турбин.

Направлениями совершенствования ГТУ в будущем станут:

- увеличение степени повышения давления и начальной температуры газа перед ТВД;
- повышение КПД турбин и компрессоров;
- дальнейшее развитие систем утилизации теплоты;
- совершенствование способов охлаждения лопаток газовых турбин, разработка более эффективных систем охлаждения с меньшими расходами воздуха;
- применение жаропрочных сплавов и покрытий.



## 7.5. ГТУ СО СВОБОДНО-ПОРШНЕВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ГАЗА

Идеи использования энергии расширения газа, выходящего из цилиндров ДВС, были высказаны в начале XX в. Так, В. И. Гриневецкий предложил расширять продукты горения топлива в двухступенчатом ДВС. Осуществить такую конструкцию не удалось ввиду больших тепловых потерь при перепуске газов из ЦВД в ЦНД.

Предложение Гриневецкого реализовалось в комбинированной установке, состоявшей из нескольких ДВС специальной конструкции, не производивших механической работы, а являвшихся генераторами газов, затем расширявшихся в газовой турбине. Такие двигатели получили название свободно-поршневых генераторов газа (СПГГ).

Одна из первых энергетических установок с СПГГ мощностью 740 кВт была применена в 1935 г. на траулере «Скагерак» [42]. На судне установили два СПГГ, производившие газы, расширявшиеся в обычной паровой машине тройного расширения, вращавшей винт.

На рис. 7.18 изображена схема газотурбинной установки с СПГГ системы инженера Пескара. С 1950 г. их строила французская фирма «Сигма». Ее СПГГ вырабатывали газ с давлением 0,4 МПа и температурой 460—480 °С в количестве, достаточном для развития на валу турбины мощности до 750 кВт.

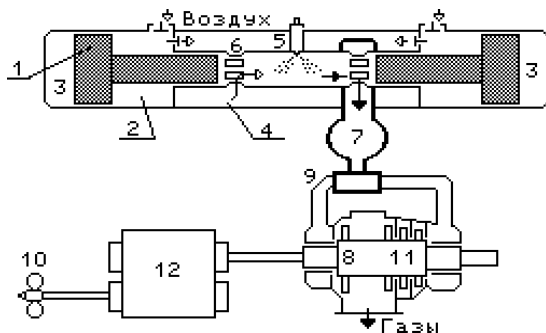


Рис. 7.18. Установка с СПГГ системы Пескара

Генератор газа был образован двухтактным дизелем со свободно-движущимися поршнями 1 и двумя поршневыми компрессорами 2. Вся мощность дизеля расходовалась на привод компрессоров. Топливо в цилиндр 6 подавала форсунка 5. Воздух от компрессоров поступал в полость 4, а из нее через продувочные окна 6 — в цилиндр.

Движение поршней от внутренней мертвой точки к наружной происходило в результате давления на них продуктов сгорания, обратный ход обеспечивался сжатым воздухом, находящимся в буферных цилиндрах 3. Движение поршней синхронизировал специальный механизм.

Образующиеся в дизеле продукты сгорания направлялись в ресивер 7, служивший для выравнивания давления, а затем — в газовую турбину переднего хода 11. Для движения судна задним ходом продукты сгорания подводились к ТЗХ 8. Поток газа переключался клапаном 9. Турбины вращали гребной винт 10 через редуктор 12. Реверсировать установка могла и другими способами — с помощью ВРШ или реверс-редуктора. Турбину обычно обслуживали несколько СПГГ.

Рассмотренные установки оказались хорошо приспособленными для длительного действия. В них газовые турбины работали при относительно низких температурах (400—500 °С) и давлениях (0,4—0,6 МПа), что позволяло отказаться от применения в их конструкции дорогостоящих жаропрочных сталей, необходимых обычным ГТУ.

По рассмотренной выше схеме была построена ГТУ отечественного лесовоза «Павлин Виноградов» грузоподъемностью 5 400 т, вступившего в эксплуатацию в конце 1960 г. ЭУ судна, рис. 7.19, состояла из четырех СПГГ фирмы «Сигма» 2, реверсивной газовой турбины 5 с шестью ступенями давления переднего и двумя ступенями заднего хода, редуктора 7. На переднем ходу она развивала мощность 2 940 кВт, на заднем — 740 кВт.

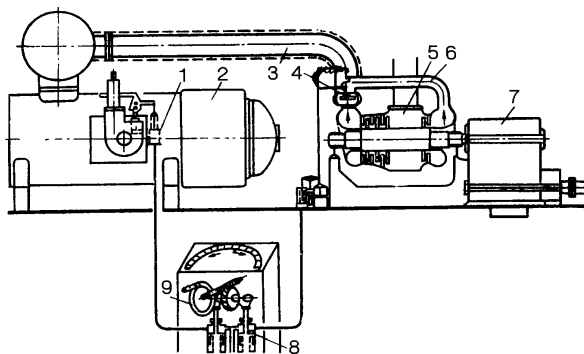


Рис. 7.19. ГТУ с СПГГ лесовоза «Павлин Виноградов»

ГТУ была приспособлена для работы на тяжелых сортах топлива (мазут 40), удельный расход которого был равен 0,258 кг/(кВт·ч) и соответствовал эффективному КПД 34 %.

Управление турбиной производилось при помощи клапана 11, соединенного с сервомотором 8. Сервомотор блокировался с устройством управления топливным насосом СПГГ 1. Газопровод 3 подавал газ к ступеням переднего хода, газопровод 6 — к ступеням заднего хода. При пуске или реверсе клапан 4 устанавливался в среднее положение. Газ из СПГГ одновременно поступал в турбины переднего и заднего ходов, при этом вал оставался неподвижным. Разворотом маховика 9 клапан 4 перемещался вверх, это приводило к тому, что газ в большем количестве поступал в ступени переднего хода, благодаря чему турбина начинала вращаться в направлении переднего хода. Дальнейшее вращение маховика вызывало увеличение подачи топлива в цилиндр СПГГ через дозирующее устройство 1. Снижение нагрузки, остановка и реверс турбины производились в обратном порядке. Регулирование мощности турбины можно было осуществлять изменением количества топлива, сгорающего в СПГГ, и количеством действующих генераторов газа [29].

Достоинством ГТУ с СПГГ являлась хорошая приемистость. Тяговая характеристика у них оказалась лучше, чем у дизелей. Эти особенности ЭУ особенно важны для рыболовных траулеров, которые должны обладать хорошими буксирными качествами. Первым рыбопромысловым судном, оборудованным такой ГТУ, стал траулер «Сагита». На судне длиной 67,3 м была установлена газовая турбина мощностью 1 325 кВт при частоте вращения 8 000 об/мин. Она через редуктор с передаточным отношением 1:32 приводила во вращение ВРШ, лопасти которого разворачивались электромотором, расположенным в его ступице. Работу турбины обеспечивали два СПГГ типа SG-34 фирмы «Сигма», вырабатывавшие на полной нагрузке 7,75 кг/с газа с давлением 0,3 МПа и температурой 225 °С. Для запуска непрогретой установки требовалось 15 минут, в течение следующих 15 минут ее мощность могла быть доведена до номинальной [10].

В 1968 г., в порядке эксперимента, ГТУ с СПГГ установили на среднем рыболовном траулере «Прогресс». Установка отечественного производства состояла из одного СПГГ типа ОР-95 и турбозубчатого агрегата ТЗА-600, работавшего на винт регулируемого шага. Неревверсивную газовую турбину образовывали пять активных ступеней давления. Редуктор ТЗА был выполнен двухступенчатым. От него приводился в действие валогенератор постоянного тока типа ГПМ-3 мощностью 100 кВт. Валогенератор снабжал судно электроэнергией как на ходовых режимах, так и при тралении. Номинальная мощность этой

ГТУ составляла 394 кВт. Запуск СПГГ производился сжатым воздухом. В ходе эксплуатации этой опытной установки были выявлены серьезные недостатки, одними из которых являлись низкий моторесурс и недостаточная экономичность.

ГТУ с СПГГ по экономичности уступали дизельным установкам. Они имели значительные габариты, их удельный вес достигал 65—85 кг/кВт. К их недостаткам относились высокая шумность и ограниченная мощность, не превышавшая 4 500 кВт. Ресурс непрерывной работы газогенератора ограничивался малым сроком службы поршневых колец, подвергавшихся высоким тепловым нагрузкам и служившим всего около 2 500 ч [10]. В настоящее время газотурбинные установки с СПГГ не строятся и не эксплуатируются.

## 7.6. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ

В 1950—1970-х гг. вспомогательные ГТУ мощностью 50—300 кВт использовались в судовых и корабельных условиях в качестве привода электрогенераторов и некоторых вспомогательных механизмов (насосов, компрессоров), а также как главные двигатели шлюпок и других небольших плавсредств.

К их конструктивным особенностям относились использование одновальной схемы и простых одноступенчатых центробежных компрессоров. Иногда, при мощностях более 170 кВт, в них применялись осевые компрессоры. В самых маломощных качестве рабочего колеса наиболее часто устанавливалась радиальная турбина. Вспомогательные ГТУ малой мощности, как правило, не имели регенерации теплоты, поэтому их КПД был низок и обычно не превышал 15—17 %.

В начале 1950-х гг. американская компания «Соляр» разработала газотурбинный двигатель типа Т-45 мощностью 33 кВт, рис. 7.20. Он предназначался для привода пожарного насоса, имел небольшие габариты и вес 80 кг. Запускался двигатель вручную, время пуска не превышало 45 секунд. Он состоял из одноступенчатого центробежного компрессора, радиальной газовой турбины и камеры сгорания, смонтированных внутри легкого трубчатого каркаса. Турбина вращалась с частотой 40 300 об/мин, насос — 4 500 об/мин. Температура газа перед турбиной составляла 615 °С, степень повышения давления была принята равной 2,44. Центробежный насос, приводимый в действие турбиной, имел производительность 110 м<sup>3</sup>/ч и развивал напор 0,7 МПа. Валы турбины и насоса соединялись посредством коничес-

кой винтовой передачи так, что их оси располагались перпендикулярно. КПД этого простейшего двигателя составлял всего 5,8 % при среднем удельном эффективном расходе топлива 1,35 кг/(кВт·ч), его ресурс не превышал 700 часов.

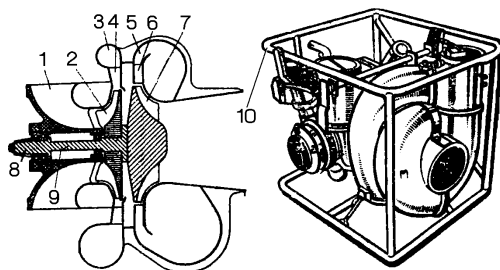


Рис. 7.20. Вспомогательный двигатель типа Т-45:

1 — приемный патрубок; 2 — компрессор; 3 — улитка компрессора; 4 — лопаточный диффузор; 5 — улитка турбины; 6 — сопловый аппарат; 7 — колесо турбины; 8 — вал; 9 — шестерня привода насоса; 10 — трубчатый каркас

В 1960-х гг. отечественный завод «Экономайзер» выпускал газотурбинный двигатель ГТУ-3 мощностью 300 кВт, рис. 7.21.

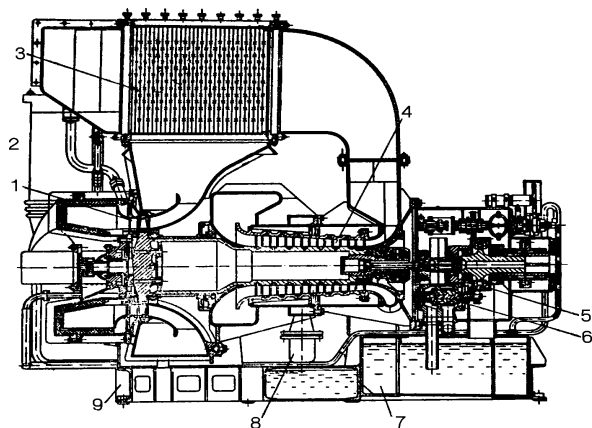


Рис. 7.21. Двигатель ГТУ-3:

1 — турбина; 2 — камера сгорания; 3 — регенератор; 4 — компрессор; 5 — редуктор; 6 — масляный насос; 7 — масляная цистерна; 8 — байпас; 9 — рама

Одновальная установка, работавшая на легком топливе, предназначалась для привода электрогенератора. Она состояла из турбины, компрессора, камеры сгорания, регенератора и зубчатой передачи.

Ее удельный вес составлял 10 кг/кВт, эффективный КПД был равен всего 15 %. Частота вращения одноступенчатой газовой турбины достигала 16 000 об/мин. Ее согласование с генератором (1 000 об/мин) производилось зубчатой передачей с раздвоением мощности. Диск газовой турбины имел воздушное охлаждение. Осевой компрессор состоял из семи ступеней, степень повышения давления в нем составляла 3,25. Ротор компрессора вращался в подшипниках скольжения. В двигателе предусматривалась регенерация теплоты. Для этого был установлен пластинчатый регенератор. Пускался двигатель электростартером [46].

На рис. 7.22 показан продольный разрез газотурбинного двигателя мощностью 150 кВт, предназначавшегося для привода аварийного генератора. Он состоял из одноступенчатого центробежного компрессора, цилиндрической камеры сгорания, одноступенчатой радиальной газовой турбины и планетарного редуктора.

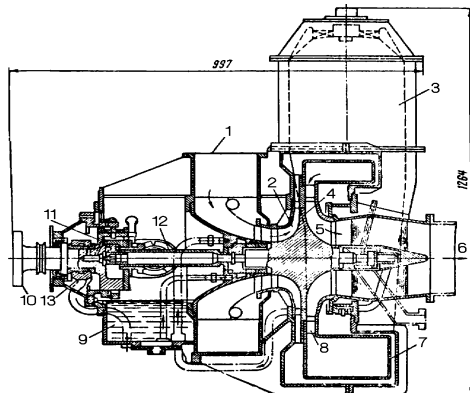


Рис. 7.22. Газотурбинный двигатель мощностью 150 кВт:

1 — подвод воздуха; 2 — компрессор; 3 — камера сгорания; 4 — ротор; 5 — турбина; 6 — выхлопной патрубок; 7 — улитка турбины; 8 — сопла; 9 — сборник масла; 10 — выходной фланец; 11 — редуктор; 12 — промежуточный вал; 13 — подшипник

Особенностью конструкции данного двигателя являлось использование однодискового ротора: с одной стороны на нем были расположены лопатки компрессора, с другой — газовой турбины. Этим обеспечивалось надежное охлаждение ротора. Промежуточный вал с муфтами передавал крутящий момент от ротора к редуктору. Генератор присоединялся к выходному фланцу редуктора. Основные параметры двигателя: начальная температура газа 780 °С, частота вращения

турбины 23 000 об/мин, масса 280 кг, ресурс непрерывной работы 1 000 часов, эффективный КПД — 8,8 %.

Запускался двигатель при помощи запальных патронов, снабженных бездымным порохом. Образовавшиеся при горении патронов газы раскручивали турбину, после чего запальное устройство воспламеняло топливо, поступающее в камеру сгорания через форсунку. Продолжительность пуска из холодного состояния составляла около 35 секунд.

В настоящее время, в связи с переходом на использование в составе ЭУ судов гражданского назначения почти исключительно дизелей, вспомогательные газотурбинные установки на рыбопромысловом и коммерческом флоте применения не находят.

## ГЛАВА 8. СУДОВЫЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

*Развитие конструкций поршневых, роторных и лопастных насосов. Навешенные и приводные насосы, паровой и электрический приводы, их сравнительная характеристика. Конструкции поршневых и центробежных насосов.*

*Способы очистки масел и топлив в СЭУ. Система статической очистки моторного масла. Центробежные сепараторы, их разновидности. Развитие сепараторов.*

*Методы опреснения морской воды, их достоинства и недостатки. Испарители избыточного давления.*

*Разновидности судовых и корабельных рулевых приводов, механизация процесса управления судном. Конструкция паровых и электрических рулевых машин начала XX в. Устройство и работа парового брашпиля и траловой лебедки. Развитие электропривода вспомогательных механизмов.*

### 8.1. НАСОСЫ И ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Насосы являются одним из первых типов вспомогательных механизмов. Поршневые насосы с ручным приводом использовались для осушения трюмов на парусниках. Их прототипом являлся бронзовый пожарный насос, построенный в Александрии около 200 г. до н. э. Он содержал все основные элементы современных: всасывающий и нагнетательный клапаны, цилиндры, поршни с эксцентриковым приводом.

С появлением на судах паровых двигателей, поршневые мокровоздушные и осушительные насосы стали приводиться в действие от вала главной машины при помощи эксцентрикового или балансирного привода. Постоянная механическая связь насоса с главной машиной создавала неудобства в процессе эксплуатации ЭУ. Отказаться от использования такого привода позволили предложенные американцем Вортингтоном в 1840-х гг. одно- и двухцилиндровые паровые насосы оригинальной конструкции. В них паровые и гидравлические цилиндры располагались противоположно и соединялись одним штоком, который также приводил в действие парораспределительный механизм. Такие насосы получили название *прямодействующих*.

К концу XIX в. на судах эксплуатировалось большое количество различных прямодействующих насосов, сходных по конструкции с насосами Вортингтона (систем «Ви́ра», «Камерон», «Шольц», «Шваде» и других), имевших как горизонтальное, так и вертикальное расположение цилиндров. Основные отличия насосов разных систем проявлялись в устройстве механизмов парораспределения, среди которых различались принудительные, полуавтоматические и автоматические.

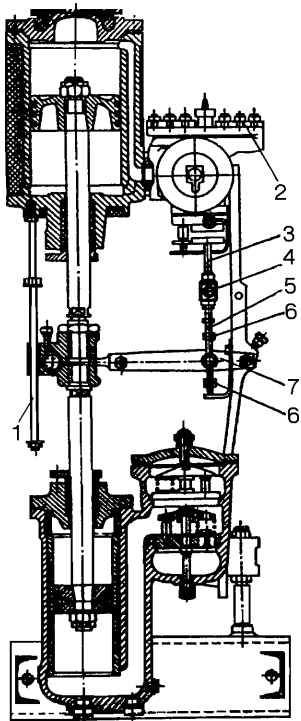


Рис. 8.1. Насос ПНП-13

На рис. 8.1 приведен разрез отечественного вертикального парового насоса типа ПНП-13 с полуавтоматическим парораспределением, использовавшегося для питания судовых котлов. Его производительность достигала  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$  при напоре  $3,35 \text{ МПа}$ , он мог работать как на насыщенном, так и на перегретом паре с давлением до  $2,3 \text{ МПа}$  и температурой не более  $320 \text{ }^\circ\text{C}$ . Цилиндры насоса изготавливались из чугуна. Гидравлический цилиндр отливался совместно с клапанной коробкой, в которой располагалось двенадцать бронзовых всасывающих и нагнетательных клапанов. Его втулка была выполнена из латуни. Паровой поршень изготавливался из чугуна, гидравлический — из латуни, он имел текстолитовые уплотнительные



кольца. В золотниковой коробке 2 располагались главный и вспомогательный золотники. Вспомогательный золотник приводился в действие от поршневого штока посредством муфты 1, рычага 7 и золотниковой тяги 5 с установочными гайками 6. Золотниковая тяга соединялась со штоком золотника 3 при помощи шарнира 4.

Горизонтальный поршневой насос, использовавшийся на судах в начале XX в., показан на рис. 8.2. Он также применялся для питания паровых котлов и назывался «донка». Основными достоинствами паровых прямодействующих насосов являлись высокая надежность, простота устройства и регулирования производительности, безопасность при перекачке горючих жидкостей, способность к саморегулированию. К их недостаткам относились ограниченная производительность и большой расход пара, достигавший 55—80 кг/(кВт·ч). Число ходов поршней не превышало 60—70 в минуту. Попытки увеличения производительности насосов за счет роста размеров цилиндров приводили к существенному возрастанию их габаритов. В большинстве насосов пар в цилиндрах не расширялся, это обстоятельство определяло их низкую экономичность. Отработавший пар обычно использовался как греющая среда для питательной воды котлов.

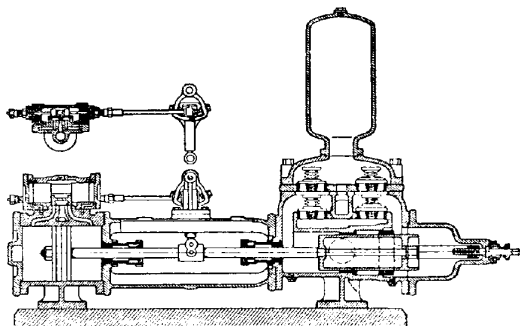


Рис. 8.2. Горизонтальная донка

Стремление снизить капитальные затраты при изготовлении поршневых насосов, а также увеличить их производительность, вызвало появление многоцилиндровых агрегатов с электрическим приводом, выпуск которых начался в 1920-х гг. В настоящее время применение паровых поршневых насосов на судах ограничено танкерами и устаревшими судами. Громоздкость донок заставила отказаться от применения их в качестве питательных устройств мощных котлов и перейти к использованию для этой цели центробежных насосов.

Наряду с поршневыми насосами, в СЭУ широкое распространение нашли *роторные*, представленные различными типами: шестеренчатыми, винтовыми, пластинчатыми и коловратными.

Прообразом роторного является пластинчатый насос Рамелли, созданный в 1588 г. В течение XVII—XIX вв. находили применение насосы с отсекающей пластиной, изготовленные из дерева. Роторные насосы, пригодные для длительной эксплуатации, были разработаны только в середине XIX в. Главная проблема, которую решали их создатели, заключалась в обеспечении надежной смазки трущихся деталей. Основными недостатками механизмов этого периода являлись большие утечки перекачиваемой среды, значительный износ и низкий КПД.

В конце XIX в. появились двухвальные насосы систем Энке и Егера, в которых полости всасывания и нагнетания разделялись с помощью вращающейся управляемой шайбы или взаимно перекачивающимися роторами одинакового размера (шестеренные и винтовые насосы). Они стали использоваться в СЭУ для перекачки топлива и масла с 1910-х гг. До середины 1930-х гг. на отечественных судах находили применение роторные насосы иностранного производства. Выпуск винтовых насосов в нашей стране был налажен в 1936 г.

К одному из наиболее широко используемых в СЭУ типов насосов принадлежат *центробежные*. Их изобретение связывают с именем Леонардо да Винчи. Среди его набросков существуют схемы, демонстрирующие возможность использования центробежной силы воды, вращающейся в криволинейном канале, для ее подъема на высоту. Концом XVII в. датируется проект центробежного насоса итальянца Жордана. В 1689 г. идеи использования центробежного эффекта для перекачивания жидкости высказывал Д. Папен. Такое устройство было построено им в начале XVIII в.

Первой примененной на практике центробежной машиной стал насос француза Ледемура, построенный в 1732 г. Он работал следующим образом. К вертикальному валу под углом крепилась труба, нижний конец которой погружался в жидкость. При вращении вала центробежные силы вызывали ее перемещение в трубе [55].

Классическую форму рабочего колеса радиального типа, присущую современным центробежным насосам, в 1818 г. предложил американец Андресс. Конструктивные формы его одноступенчатого насоса с колесом, имевшим прямые лопасти, сохранились до настоящего времени. Насос Андресса был усовершенствован в 1846 г., после того, как было доказано, что изогнутые лопасти колеса обеспечивают

создание большого напора. В 1851 г. Андrevс запатентовал многоступенчатый центробежный насос.

В насосах Андrevса использовались полуоткрытые рабочие колеса. Насос с закрытым колесом был построен в 1850 г. англичанином Гвином. Насосы Гвина, приводившиеся в действие от быстроходных паровых поршневых машин или турбин, использовались на судах и кораблях во второй половине XIX в.

Предложенный Андrevсом многоступенчатый насос был улучшен О. Рейнольдсом, введшим в его конструкцию направляющий аппарат и обратные подводящие каналы. Насос, запатентованный им в 1875 г., уже мало отличался от современных устройств.

Создателем первого отечественного центробежного насоса стал генерал-майор А. А. Саблуков. В основе его конструкции, появившейся в 1835 г., лежал ранее построенный им вентилятор. Насос имел диаметр 8 и ширину 2 дюйма (203 мм и 51 мм соответственно). Конструкция оказалась неработоспособной: она не поднимала воду. Работу над своим устройством, названным им «водогоном», Саблуков продолжил в 1838 г.: «Я возобновил опыты со своим аппаратом и, ничего в нем не изменяя, полностью погрузил его в длинный бак с водой... На этот раз результат превзошел все мои ожидания, так как оказалось, что при описанной выше установке аппарат мог поднимать воду...».

Центробежный насос, применявшийся на судах в конце XIX в., показан на рис. 8.3. Он состоял из корпуса, образованного отливками 6 и 7, выполненными из бронзы или чугуна; рабочего колеса 8 с изогнутыми лопатками, насаженного на вал, соединенный с приводным двигателем. Пространство, в котором вращалось рабочее колесо, с боков было закрыто стенками, с округлости стенки закруглялись, образуя постепенно расширяющийся улиткообразный канал, оканчивающийся отливным патрубком 10. В центральной части, прилегающей к валу, внутренняя полость через круглые пролеты сообщалась с пространством между стенками, переходившим внизу в приемный патрубок 9. Вал вращался в

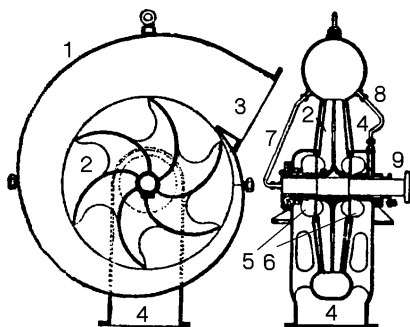


Рис. 8.3. Центробежный насос конца XIX века

подшипниках 1 и 2 с вкладышами из бакаутowego дерева. Они смазывались перекачиваемой водой, поступающей к ним из нагнетательного патрубка по трубкам 4 и 5. Вкладыши на внутренней поверхности имели продольные канавки [46].

К 1910 г. КПД центробежных насосов достиг 82—84 %. В этот период были запатентованы гидравлические разгрузочные устройства, предназначенные для уравнивания осевой силы в многоступенчатых центробежных насосах. Центробежные насосы с паротурбинным или электрическим приводом, состоящие из нескольких последовательно включенных ступеней, использовались в качестве питательных для судовых и корабельных котлов больших мощностей. Конструкция одного из подобных устройств, производившихся фирмой «Зульцер» в 1920—1930-х гг., показана на рис. 8.4.

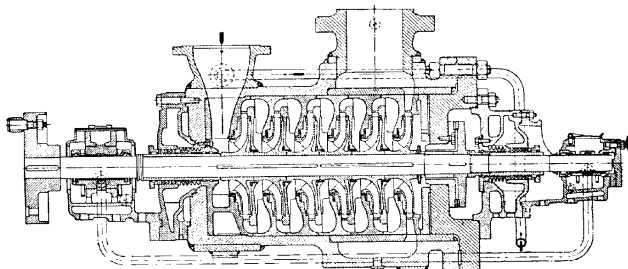


Рис. 8.4. Многоступенчатый центробежный насос 1920-х гг.

Забортную воду в конденсаторы пара мощных паротурбинных установок подавали *осевые* (пропеллерные) насосы большой производительности. В них всасывание и нагнетание воды производилось вдоль оси, на которой насаживалось рабочее колесо в виде пропеллера. Эти устройства отличались относительно небольшими размерами и способностью перекачивать значительные количества жидкости при низком напоре. Их производство было начато в 1910—1915 гг. [56].

Надежная и экономичная работа судовых дизелей во многом определяется качеством используемого в них топлива и смазочного масла. Очистка моторного масла до начала 1920-х гг. велась так называемым *статическим* методом. Она производилась при помощи отстойных цистерн, являлась дешевой и простой, но крайне неэффективной. На качество очистки сильное влияние оказывали качка и малая пропускная способность отстойных цистерн. С начала 1920-х гг., с появлением на судах центробежных

сепараторов, статическая очистка стала использоваться только вместе с другими методами (фильтровальным и динамическим).

Схема статической очистки масла приведена на рис. 8.5. Загрязненное масло насосом 1 подавалось в сборную цистерну 2. Отстойная цистерна 3 на треть заполнялась водой, которая нагревалась до температуры 80 °С паром, поступавшим в паровой змеевик 4. Затем в отстойную цистерну из сборной подавалось масло, после чего оно отстаивалось в течение 8—12 часов. Отстоявшееся масло спускалось в расходную цистерну 5, скопившийся осадок удалялся через клапан 6. Периодически, через каждые 200—400 ч работы, отстойная цистерна подвергалась очистке [91].

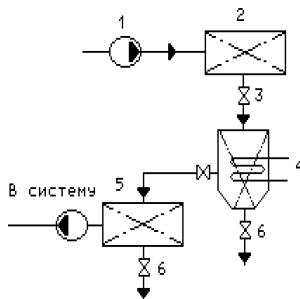


Рис. 8.5. Система статической очистки масла

Ускорение очистки достигалось добавлением в масло коагулянтов, вызывавших осаждение примесей. В качестве коагулянта наиболее часто использовалась каустическая сода. Применение коагулянтов на судах практиковалась редко, они обычно использовались в береговых условиях в специальных установках, на которые с судов сдавалось загрязненное масло.

Более высокое качество обработки обеспечивалось *фильтровальной* очисткой, в ходе которой масло проходило через различные фильтры: сетчатые, тканевые, пластинчатые и комбинированные с отстойниками.

*Динамическая* очистка масел и топлив велась при помощи центробежных сепараторов, появившихся в начале 1920-х гг. В 1930-х гг. на судах использовались сепараторы трех основных систем: тарельчатые «Лаваль» и «Титан», и трубчатые «Шарплес». В тарельчатых проходило тонкослойное сепарирование, в трубчатых — толстослойное.

Первой производство судовых сепараторов наладила фирма «Лаваль», однако наиболее распространены были устройства фирмы «Шарплес», рис. 8.6. Сепараторы этого типа были установлены на теплоходе «Алексей Рыков», построенном в 1928 г.

Они были образованы вертикальным стальным цилиндром 1, в верхней части которого закреплялся трехкрыльчатый ротор 2, предназначенный для увлечения жидкости вместе с наружным цилиндром. Этот цилиндр при помощи шпинделя в верхней части был подвешен на шарикоподшипниках, а внизу он имел направляющую втулку, препятствующую боковым перемещениям. Цилиндр, вращавшийся с частотой

17 000 об/мин, размещался в чугунном коническом кожухе. Очищаемое масло поступало по трубе 3 через сопло, проходящее сквозь направляющую втулку в нижнюю часть цилиндра. Под действием центробежной

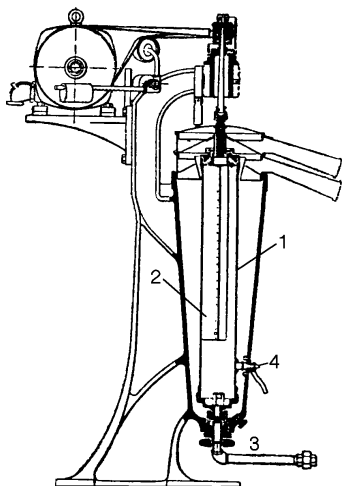


Рис. 8.6. Трубчатый сепаратор

силы происходило разделение жидкости, чистое масло и грязь удалялись через отдельные патрубки. Тормоз 4 обеспечивал остановку цилиндра 1.

Отечественная промышленность в 1920—1930-х гг. центробежные сепараторы не производила, поэтому их приходилось приобретать за рубежом, где стоимость подобных устройств составляла 2 000—2 500 долларов США (в ценах 1928 г.). Выпуск отечественных сепараторов начался в 1940-х гг. В этот период изготавливались несамочищающиеся сепараторы типов НСМ-3 и НСМ-4. В 1960—1961 гг. на их основе были разработаны машины типов СЦ-1,5 и СЦ-3, нашедшие широкое применение на промышленных и

транспортных судах. Позднее стали выпускаться самоочищающиеся устройства типов СЦС и СЛ с номинальной производительностью 3—19 т/ч. В 1980-х гг. в нашей стране по лицензии фирмы «Лаваль» производились центробежные автоматизированные сепараторы.

Первые сепараторы требовали систематической ручной чистки, периодичность которой зависела от качества обрабатываемого топлива или масла. В 1950-х гг. самочищающиеся сепараторы с периодическим выпуском грязи без остановки стала выпускать фирма «Лаваль». В 1960-х гг. фирма «Пеннвоят» (бывшая «Шарплес») освоила производство центробежных устройств типа «Гравитрол», имевших непрерывное удаление отделяемого шлама.

Прослеживающаяся в последние годы тенденция к использованию в судовых условиях высоковязких топлив с большой плотностью потребовала совершенствования конструкции центробежных сепараторов. Одной из последних разработок в этой области стали не имеющие гравитационных дисков масляные и топливные сепараторы типов ЛОРХ и ФОРХ, созданные фирмой «Лаваль». В них отделенные от жидкости шлам и вода накапливаются на периферии барабанов

и автоматически сбрасываются при разгрузке. Очищаемая жидкость подается постоянно, даже в момент разгрузки. Специальные датчики обеспечивают непрерывный контроль наличия воды в очищенной жидкости. Сигналы от них поступают в управляющий блок, автоматически запускающий программу разгрузки сепараторов.

Фирма полагает, что применение подобных устройств будет способствовать сокращению расходов на топливо за счет применения продуктов с более высокой вязкостью и плотностью. В сепараторе LOPX «осветление» масла происходит с добавлением воды, вытесняющей масло и повышающей качество очистки. Для очистки и регенерации циркуляционного масла дизелей фирма «Лаваль» разработала автоматизированные сепарационные установки типов MMPX 303 и MMPX 304. В их состав входят электронагреватель, дисковый сепаратор, программируемое управляющее устройство и саморазгружающийся накопитель шлама.

## 8.2. ВОДООПРЕСНИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Судовые запасы пресной воды пополняются при помощи водоопреснительных установок. Одним из самых старых способов опреснения морской воды, применявшимся еще в эпоху парусного флота, являлась *дистилляция*, осуществлявшаяся при давлении выше атмосферного. Сущность этого способа состояла в следующем. Морская вода подавалась насосом в специальный аппарат — испаритель, где нагревалась за счет тепла водяного пара, рис. 8.7а. Образовавшийся при кипении вторичный пар, практически не содержащий солей, конденсировался, после чего полученный конденсат отводился в цистерну и затем использовался для пополнения запасов воды. Соли, накапливавшиеся в испарителе, удалялись в виде рассола в ходе продувания.

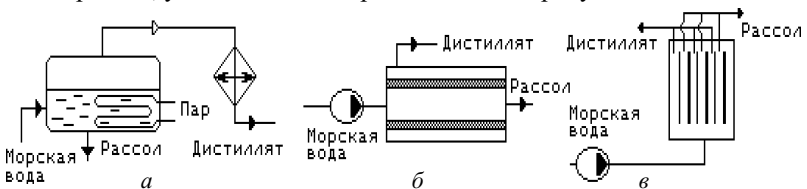


Рис. 8.7. Способы опреснения морской воды

Первый отечественный испаритель в конце XIX в. разработал инженер Зотов. В 1904 г. инженер Бессонов предложил регенеративный испаритель. Оба устройства широкого применения в России не нашли. Спустя десятилетие идеи Бессонова реализовали во Франции.

В конце XIX в. на судах и кораблях российского флота стали устанавливать испарители системы Р. Круга. Они имели производительность 1—2 т/ч и покрывали потребности судна в добавочной воде для паровых котлов, расход которой в ЭУ с поршневыми машинами и котлами с угольным отоплением составлял 0,16—0,41 л/(кВт·ч). В установках с турбинами и котлами на жидком топливе его величина была в три раза меньше. Применение испарителей увеличило дальность плавания пароходов, повысило надежность котлов, исключив использование в них заборной воды.

Дистилляция является наиболее распространенным способом опреснения морской воды в судовых условиях и в настоящее время. Традиционными типами опреснительных установок, применявшимися на судах, были испарители избыточного давления и вакуумные.

Первыми на судах стали устанавливать *испарители избыточного давления*, в которых в качестве греющей среды использовался насыщенный пар. Один из них, применявшийся в 1920—1940-х гг., показан на рис. 8.8.

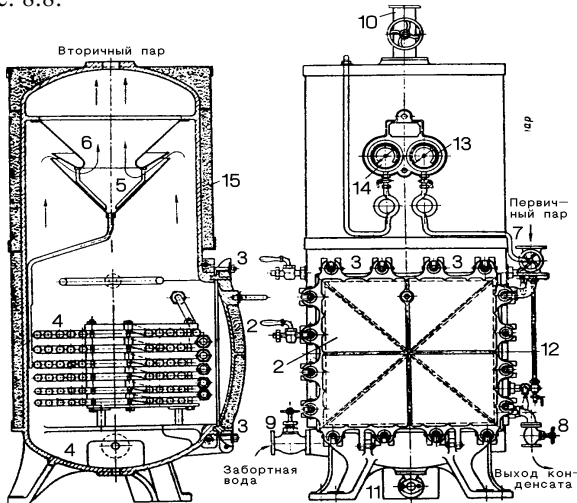


Рис. 8.8. Испаритель избыточного давления

Его корпус 1 отливался из чугуна. Внутри него располагались нагревательные элементы 4, образованные медными трубами. Первичный пар поступал в трубы нагревателя через клапан 7, конденсат первичного пара отводился через клапан 8 в теплый ящик котла. Предварительно подогретая морская вода подавалась в испаритель через



питательный клапан 9. Образующийся из нее вторичный пар проходил вначале через сепарирующие конусы 5 и 6, а затем через клапан 8 отводился в отдельный конденсатор. Продувание рассола из корпуса испарителя производилось посредством клапана 11. Доступ к нагревателю обеспечивался через съемную крышку 2. Корпус аппарата был теплоизолирован слоем асбеста 15. Давление первичного и вторичного пара контролировалось при помощи манометров 13 и 14.

Главными недостатками испарителей избыточного давления являлись интенсивное накипеобразование на поверхности нагревателей и значительные расходы топлива для получения дистиллята. Испарители с избыточным давлением широко использовались на судах до начала 1960-х гг. В настоящее время подобные испарители не производятся и сохранились как исключение на судах старой постройки.

Современные испарители являются вакуумными. В них морская вода кипит при давлении ниже атмосферного. Испарители выполняются *поверхностными* или *адиабатными*. В первых морская вода испаряется с поверхности нагревательных элементов, во вторых — она нагревается в отдельном подогревателе, после чего в виде струй поступает в аппарат, где испаряется за счет поддерживаемого в его корпусе пониженного давления. Вакуумные испарители, в отличие от установок с избыточным давлением, не требуют для своей работы пара, производимого котлом. Источниками тепла для них являются рабочие среды судовых дизелей, в первую очередь — охлаждающая вода. Скорость образования накипи в таких установках значительно ниже, чем в испарителях избыточного давления.

Во второй половине XX в. были предложены другие способы опреснения, среди которых наиболее часто используются обратный осмос и электродиализ. В установке *обратного осмоса*, рис. 8.7б, забортная вода под давлением 4—5 МПа поступает в специальные коллекторы, в которых располагаются полупроницаемые мембраны и камеры для опресненной воды. Мембраны, изготовленные из микропористых синтетических материалов — ацетатцеллюлозы, этилцеллюлозы, ароматических полиамидов, — задерживают соли и пропускают молекулы воды.

Недостатками такого способа опреснения являются необходимость тщательной очистки морской воды перед подачей ее в аппарат, малая скорость фильтрации, большая удельная масса установок. Достоинством аппаратов обратного осмоса является их низкая энергоемкость. Ими снабжены современные ярусоловные сейнеры,

построенные в начале 1990-х гг., составляющие в настоящее время основу камчатского рыбопромыслового флота. Применение подобных устройств в судовых условиях следует рассматривать в качестве перспективного направления совершенствования опреснительных установок.

Применение *электродиализа* также позволяет избежать значительных затрат тепла. Электродиализ является наиболее эффективным при обработке морской воды с невысоким общим солесодержанием. Он основан на способности полупроницаемых мембран из полимеров с приложенным к ним электрическим полем пропускать только ионы с одноименными зарядами. В корпусе электродиализного аппарата, рис. 8.7в, устанавливаются чередующиеся положительно и отрицательно заряженные мембраны, образующие камеры, в которых собирается рассол и дистиллят. В отечественной практике одной из первых попыток использования такого метода очистки воды на судне была принята в конце 1950-х гг. Электродиализная установка была применена на черноморском пароходе «Тула».

### 8.3. ПАЛУБНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Палубными механизмами, устанавливаемыми на парусных судах, являлись шпили, брашпили, устройства для спуска шлюпок, рулевые приводы. До середины XIX в. они имели ручной привод. Так, руль разворачивался при помощи длинного румпеля, штуртрота и барабана с ручными штурвалами. При плавании в штормовую погоду наблюдались случаи, когда удары волн о руль вызывали ушибы рук рулевых, а иногда выбрасывали людей за борт. Для того чтобы обезопасить рулевых стали применять ножные тормоза у штурвалов. На судах с большим водоизмещением перекладка руля требовала значительных физических усилий рулевых, число которых могло достигать десяти человек.

Простейшим рулевым приводом, доставшимся первым пароходам в наследство от парусных судов, был румпельный, рис. 8.9а. Поворот баллера руля 1 с насаженным на него румпелем 2 осуществлялся при помощи кожаного, тросового или цепного штуртрота 3. Концы штуртрота направлялись при помощи блоков и при вращении барабана 4 сматывались или наматывались на него, обеспечивая разворот румпеля. Недостатками такого привода являлись вытягивание штуртротосов, вызывавшее недопустимые слабины, и значительные затраты энергии для разворота руля.

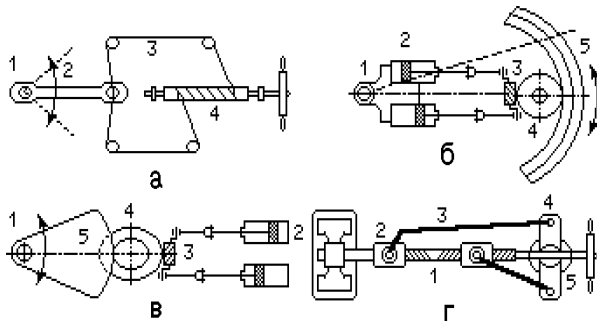


Рис. 8.9. Типы рулевых приводов

В 1839 г. появились винтовые рулевые приводы, рис. 8.9г. При вращении винта 1, снабженного левой и правой нарезками, ползуны 2 перемещались в противоположные стороны и через тяги 3 разворачивали поперечный румпель 4, связанный с баллером руля 5.

Первые винтовые приводы не имели направляющих для движения ползунков, поэтому удары волн о перо руля воспринимались непосредственно винтом и нередко вызвали его поломку. Вскоре они были усовершенствованы и приобрели вид, показанный на рис. 8.11. Винтовые приводы занимали мало места, что оказалось особенно удобным качеством для боевых кораблей, на которых они, в основном, и применялись. Их главным недостатком являлся низкий КПД.

Попытки механизировать процесс управления судном стали предприниматься с середины XIX в. Основным источником энергии на судах в тот период был пар, поэтому первые механические рулевые устройства снабжались паровыми машинами. Золотники рулевых машин были связаны со штурвалами при помощи различных дистанционных приводов: механических валиковых, электрических, гидравлических телемоторов. Коленчатые валы паровых машин соединялись с баллером руля при помощи разнообразных рулевых приводов: штуртросовым по типу показанного на рис. 8.9а, ледокольного типа (расположенного на румпеле), рис. 8.9б, зубчатый секторным, рис. 8.9в и др.

Обычно *паровые рулевые машины* выполнялись двухцилиндровыми простого расширения, мотыли их коленчатых валов заклинивались под углом 90°. Рулевые машины управлялась с поста, расположенного в рубке, при помощи основного дистанционного привода. Надежность рулевого управления повышал аварийный привод. Для борьбы с непроизводительными потерями пара при остановке рулевой

машины использовались клапаны экономии. Они позволяли прекратить доступ пара, когда ее золотник немного не доходил до своего среднего положения.

Первая паровая рулевая машина была установлена в 1848 г. на уникальном английском судне «Грейт Истерн». На нем впервые предусматривался дистанционный указатель положения пера руля. В российском флоте первую паровую рулевую машину применили на фрегате «Князь Пожарский», построенном в 1873 г. Несколько раньше, в 1865 г., на броненосном фрегате «Петропавловск» осуществили привод барабана штуртроса от гребного вала. На рис. 8.10 показана одна из конструкций паровых рулевых машин, использовавшихся на судах и кораблях небольшого водоизмещения в начале XX в. Управлять ею можно было как с ходового мостика, так и при помощи штурвала, установленного в рулевом отделении. Два вертикально расположенных паровых цилиндра с золотниковым парораспределением приводили в действие коленчатый вал с червяком. Сочлененное с ним червячное колесо было связано со звездочкой штуртроса, его вращение вызывало перекладку руля.

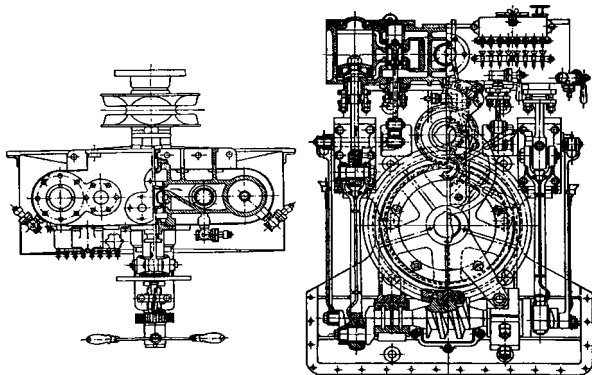


Рис. 8.10. Паровая рулевая машина

Первые образцы *электрических рулевых машин* выполнялись по контакторной системе. Такие машины в отечественном флоте впервые были использованы на эскадренных броненосцах «Пересвет» и «Ослябя», построенных в 1901 г. В качестве резервных приводов руля на этих кораблях установили паровые машины. В последующие годы на отечественных кораблях применялись более совершенные электрические рулевые машины с мотор-генератором системы Федорицкого. Федорицкий также являлся автором оригинальной конструкции дифференциала, использовавшегося в винтовых рулевых приводах.

Электрические рулевые машины, установленные на кораблях, обычно приводили в действие руль при помощи винтового привода. На гражданских судах руль наиболее часто разворачивался зубчатым сектором. Винтовой привод баллера, рис. 8.11, управлялся двумя электродвигателями 1 и 2, которые раздельно или вместе вращали дифференциал Федорицкого 3, в свою очередь, предававший вращение через цилиндрические зубчатые колеса 4 и 5. Баллер руля снабжался колодочным тормозом, управлявшимся маховиком 6.

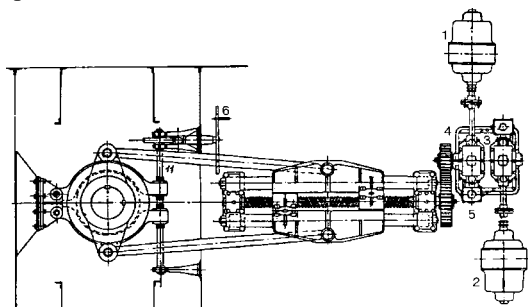


Рис. 4.11. Винтовой электропривод баллера руля

Первый в России *гидравлический рулевой привод* был испытан в 1883 г. на миноносце «Взрыв». Установка гидравлических рулевых машин на отечественные корабли началась в 90-х гг. XIX в. Впервые их применили на императорской яхте «Штандарт» и крейсере «Боярин». Ранние гидравлические рулевые машины были тяжелыми и громоздкими. Они имели два гидравлических цилиндра, перемещавших румпель, золотник с рычажным сервомотором, гидравлический аккумулятор и поршневой насос с автоматическим пуском в ход и остановкой. В более поздних конструкциях золотник и аккумулятор не применялись, поршневой насос в них был заменен быстроходным ротационным. Это позволило облегчить машину и сделать ее значительно компактнее [75]. В настоящее время гидравлические рулевые машины являются наиболее распространенным типом привода рулевых устройств на гражданских судах различных назначений.

На парусных судах и первых пароходах якоря ручными шпилями выбирало большое количество людей, «выживавших» шпиль вымбовками. С ростом водоизмещения судов масса якорей стала быстро увеличиваться. Вручную поднимать их стало невозможно. Первые якорные машины появились в конце 1850-х гг. Их конструкция в общих чертах сохранялась на протяжении почти целого

века. На рис. 8.12 показан паровой брашпиль транспортного судна. Его машина, во многом, аналогична двигателям, использовавшимся в рулевых приводах.

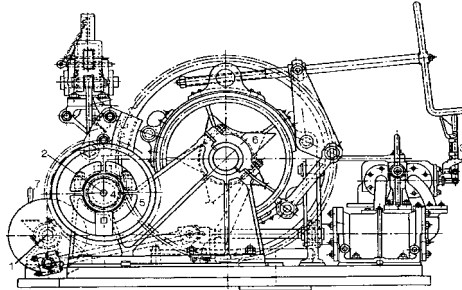


Рис. 8.12. Паровой брашпиль

Коленчатый вал 1 связан с промежуточным 2 цилиндрическими шестернями. На конце промежуточного вала для выбора швартов имеются турочки. Управляется машина рукояткой 3. Вращение от промежуточного вала к грузовому передается зубчатыми колесами 4 и 5. Цепные барабаны 6 соединены с грузовым валом муфтами. При необходимости поднимать якорь можно вручную. Ручной привод включается рукояткой 7. Грузовой вал снабжался ленточным тормозом.

Паровой привод вспомогательных механизмов являлся менее экономичным, чем электрический или гидравлический. Его недостатки особенно сильно проявлялись зимой, когда нередко замерзали трубы с конденсатом. С другой стороны, он отличался надежностью, имел хорошие маневренные качества, выдерживал длительные перегрузки.

Электрический привод механизмов стал использоваться с конца 1880-х гг. Первым отечественным кораблем с электрическим освещением и приводом вентиляторов стал крейсер «Адмирал Нахимов», построенный в 1885 г. Он имел электростанцию мощностью 35 кВт с напряжением 50 В. Производство судовых электродвигателей в России началось на Балтийском заводе в 1895 г.

Активная электрификация вспомогательных механизмов началась в 1920-х гг. и совпала с быстрым ростом количества судов, оборудованных дизельными ЭУ. На новых судах, не имевших мощных паровых котлов, применять неэкономичный паровой привод насосов, вентиляторов и палубных механизмов было признано нецелесообразным.

В 90-х гг. XIX в. в составе артиллерийских систем боевых кораблей началось использование *объемного гидропривода*. В начале XX в. он нашел применение и в составе грузовых и палубных механизмов.

Специфической принадлежностью рыболовецких судов являются промысловые механизмы, среди которых важную роль играют траловые лебедки. Предшественниками современных электрических и гидравлических траловых лебедок являются паровые механизмы. Они появились в конце XIX в. и использовались до середины 60-х гг. XX в.

Паровые траловые лебедки промысловых судов выполнялись одно и двухпередачными с двумя барабанами на общем валу. Каждый барабан имел свою кулачную муфту для соединения с валом, поэтому они могли вращаться как порознь, так и совместно. Однопередачные траловые лебедки снабжались грузовым валом, имевшим двойные турачки, двухпередачные — простыми. Однопередачная траловая лебедка парового рыболовецкого траулера постройки конца 1920-х- середины 1930-х гг. показана на рис. 8.13.

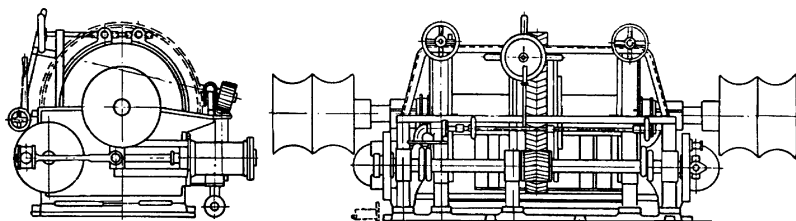


Рис. 8.13. Траловая лебедка с паровым приводом

Она приводилась двухцилиндровой машиной двойного действия мощностью 62 кВт с частотой вращения 200 об/мин. Диаметр ее цилиндров был равен 165 при ходе поршня 254 мм. Лебедка работала на насыщенном пара с давлением 1,25 МПа и развивала тяговое усилие до 4 т. Скорость выбирания ваеров трала составляла 60 м/мин.

Перечисленные в этой главе вспомогательные механизмы не исчерпывают все многообразие устройств, применяющихся на судах. Их совершенствование в настоящее время протекает в направлениях повышения надежности, снижения стоимости изготовления и монтажа, автоматизации управления, уменьшения трудоемкости технического обслуживания и затрат энергии, используемых для работы.

## ГЛАВА 9. ВКЛАД ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИЕ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Первые отечественные научные работы в области создания судовых парозенергетических установок. Разработка учебных курсов для подготовки механиков по эксплуатации судовых и корабельных парозенергетических установок. Развитие вопросов теории и создание научных методов расчета и конструирования паровых машин, котлов и турбин.*

*Разработка теоретических основ работы ДВС. Классическая методика теплового расчета В. И. Гриневецкого-Е. К. Мазинга, ее развитие. Современные методы расчета ДВС. Периодические издания, освещавшие вопросы эксплуатации и совершенствования конструкции судовых ДВС и вспомогательных механизмов. Начало подготовки специалистов по ДВС, первые учебники. Крупнейшие ученые в области проектирования и эксплуатации ДВС. Развитие теории газовых турбин и вспомогательных механизмов.*

В России совершенствование судовых парозенергетических установок протекало в тесной связи с развитием теплотехнической науки. Основы отечественной теплотехники заложил М. В. Ломоносов, опубликовавший в 1744—1747 гг. работы о механической теории теплоты. Уже в ходе постройки своей машины Н. И. Ползунов использовал некоторые положения, высказанные Ломоносовым. Однако отсутствие стройной теории тепловых машин сдерживало развитие судовой техники. Первые попытки обобщения накопленного опыта строительства и эксплуатации паровых котлов и машин стали предприниматься в начале XIX в.

Наиболее ранней работой такого рода в России стал труд инженера П. П. Базена, посвященный исследованию движения колесных пароходов по рекам. В нем он показал преимущества паровых судов перед другими видами транспорта. В 1817 г. Базена за работы в области теории пароходов избрали членом-корреспондентом Императорской Академии наук. В 1830 г. он одним из первых высказал предложение о необходимости использования пара повышенных параметров.

В 1823 г. была опубликована работа Д. С. Чижкова, в которой рассматривались конструкции различных паровых машин. Проектированием специальных судовых механизмов в 20—30-е гг. XIX в. занимался инженер П. Г. Соболевский, создавший конструкции оригинальных



балансирных и безбалансирных установок для пароходов, плававших по Волге и Каме. Первыми отечественными судовыми эксплуатационными документами являются составленные в 1819 г. для военного парохода «Скорый» «Опись частей паровой машины с механизмом на судне № 1» и «Опись паровому судну и в нем устройству».

Активное развитие теории паровых машин началось в первой половине XIX в. В 1835 г. появилась теория Памбура, в которой ошибочно считалось, что расширение пара в цилиндрах машины протекает по верхней пограничной кривой. В период 1840—1860 гг. разработкой теоретических циклов паровых машин занимались Клаузиус, Ренкин и другие ученые. В 1855 г. был опубликован калориметрический метод исследования паровых машин, разработанный Гирном.

Отечественные ученые в 40—60-х гг. XIX в. выполнили ряд оригинальных исследований в области термодинамики и теплотехники. В их число вошли изучение свойств водяного пара, разработка теории парораспределения и циклов паровых машин, методики расчетов прочности элементов машин и вспомогательных механизмов.

Параллельно с выполнением научных работ российские ученые создавали учебную литературу. Первыми такими трудами стали вышедшие в 1842 и 1849 гг. книги преподавателя Учебного морского экипажа Н. Н. Божерянова «Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин» и «Теория паровых машин». Последняя работа считается первым отечественным учебником, предназначенным для подготовки судовых механиков. В ней излагались основы теории, вопросы конструирования и эксплуатации паровых машин. В 1850 г. эта книга была удостоена Демидовской премии. Вся научная и педагогическая деятельность Н. Н. Божерянова была посвящена подготовке специалистов-механиков для отечественного флота.

В 1858 г. А. А. Добронравов опубликовал книгу «Общая теория паровых машин», в которой приводились уравнения, позволяющие рассчитывать размеры деталей движения. Оригинальный метод определения мощности главных машин был разработан С. О. Бурачком. В 80-х гг. XIX в. исследованием паровых машин занимался инженер А. П. Бородин. В эти же годы профессор И. А. Вышнеградский разработал теорию регулирования, ставшую основой для последующего развития средств автоматизации СЭУ.

В 1896 г. вышел труд В. И. Калашникова, в котором он обобщил свой опыт создания паровых установок для речных пароходов — «Записки конструктора и атлас пароходных машин Волжского бассейна».

К ней прилагался атлас с чертежами гребных колес, форсунок, паровых котлов и машин. Эта работа сыграла большую роль в деле подготовки нескольких поколений судостроителей и специалистов по эксплуатации парознергетических установок.

В 1883 г. профессор Н. П. Петров предложил гидродинамическую теорию смазки, основные положения которой в большой степени способствовали развитию машиностроения и энергетики. Его первая работа в этой области называлась «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости». В ней рассматривалась проблема организации смазки механизмов. Задачи своего исследования Н. П. Петров определял следующим образом: «Расходы на топливо для машин, считающиеся у нас в России десятками миллионов, заслуживают самого серьезного внимания. Увеличение расхода на топливо на 5 %, на 10 %, может легко явиться вследствие неудовлетворительных условий смазывания, а это выразится в народном хозяйстве потерями миллионов рублей. Таковы теперь причины, заставляющие наших техников обратить все свое внимание на правильный выбор смазочных материалов... Те же самые причины побудили и меня написать эту статью, чтобы по мере сил моих содействовать развитию техники» [7].

В 1889 г. инженер-механик В. И. Афонасьев предложил формулу, позволявшую определять величину мощности паровых машин, требующейся для достижения судном заданной скорости.

В развитии теории парораспределения поршневых машин большие заслуги имел профессор Морской академии Ф. А. Брикс, который в 1890 г. разработал графический и аналитический методы расчета парораспределительных механизмов. Предложенная Бриксом бицентровая золотниковая диаграмма широко использовалась при проектировании судовых машин. В 1929 г. он опубликован труд «Основы проектирования морских поршневых машин».

В конце XIX в. вышли труды А. А. Брандта по термодинамике пара, паровым циклам, истории развития паровых машин. Значительную роль в развитии теории судовых паровых машин сыграл труд профессора А. И. Погодина, изданный в 1903 г.

Заметный вклад в развитие теории паровых двигателей внес знаменитый теплотехник профессор В. И. Гриневецкий. В работе «Теория паровых машин», опубликованной в начале XX в., он исследовал особенности протекания теплообмена в цилиндрах. Гриневецкий разработал методику составления и анализа теплового баланса машин и предложил систему коэффициентов полезного действия. Вопросы

теплообмена изучал профессор А. А. Радциг, выпустивший работу «Математическая теория обмена тепла в цилиндрах паровых машин».

В послереволюционный период развитие теории паровых машин продолжали К. А. Стриж, В. А. Аничков, А. В. Голынский и другие. Профессор К. А. Стриж в своей работе, вышедшей в 1932 г., дал систематическое изложение основ тепловых процессов, протекающих в судовых паровых машинах, а также порядка их проектирования. Работы В. А. Аничкова были посвящены разработке методов расчета безрессиверных и клапанных машин и развитию общих вопросов их теории. А. В. Голынский создал методику расчета тепловых процессов с использованием *i-s* диаграммы.

Одним из первых к выводу о необходимости изучения явлений, протекающих в паровых котлах, пришел И. И. Ползунов. В течение второй половины XIX в. и в начале XX в. отечественные ученые и инженеры решили ряд задач, связанных с исследованием и расчетом процессов, лежащих в основе работы паровых котлов. Эти работы имели большое значение для развития судовых котельных установок. В 1864 г. вышла работа И. П. Алымова, посвященная расчету тяги в паровых котлах и скорости подачи воздуха в их топки. И. П. Алымов известен также как инициатор использования искусственной тяги. Его труды легли в основу современных методов аэродинамического расчета. Совершенная методика расчета сопротивлений газоздушных трактов котлов содержится в труде «Нормы аэродинамического расчета котельных агрегатов», опубликованном Центральным котлотурбинным институтом в 1949 г.

В конце 1860— начале 1870-х гг. в России активно велись работы по использованию нефти и нефтепродуктов в качестве топлива для судов. Применение нефтяного отопления выявило ряд новых факторов, с которыми раньше судовые специалисты при эксплуатации котлов не встречались. Это вызвало их активное обсуждение в отечественной технической литературе, в частности, — в журнале «Морской сборник».

В 1878 г. А. А. Летний опубликовал работу «Влияние высокой температуры на нефть», в которой он заложил основы одного из методов глубокой переработки нефти — высокотемпературного крекинга. На основе работ А. А. Летнего были сконструированы отечественные нефтеперегонные аппараты.

Изучением процессов горения топлива занимался профессор В. Ф. Лунгин. Он предложил ставшие классическими способы определения теплоты сгорания топлива. Разработкой вопросов использования

в паровых котлах жидкого топлива занимался С. О. Бурачек. В 1881 г. профессор И. В. Вышнеградский издал труд, посвященный исследованию динамической устойчивости паровых котлов, имевший большое значение для развития их средств автоматизации.

В 80-х гг. XIX в. выдающимся инженером В. Г. Шуховым были созданы конструкции оригинальных котлов и форсунки, хорошо приспособленных для массового производства. Он же предложил современный метод переработки нефти и получения из нее топлив и смазочных материалов. Большой вклад в проблемы рационального использования нефти внес великий химик профессор Д. И. Менделеев.

Вопросами обеспечения надежности циркуляции воды в котлах занимался в 90-е гг. XIX в. инженер Санкт-Петербургского Металлического завода В. С. Сазонов. Впоследствии первые в мире нормы расчета естественной циркуляции в котлах были созданы в нашей стране.

В XIX в. тепловой расчет котла сводился к определению величины его поверхности нагрева на основе эксплуатационных данных о количестве пара, которое можно получить с единицы ее площади. Расчет прочности конструктивных элементов котлов также базировался на эмпирической основе. При этом конструкторы руководствовались, как образцами, уже построенными установками.

Такие примитивные методы становились неприменимыми по мере усложнения конструкций котлов и роста их тепловой напряженности. Разработкой теоретических основ рабочих процессов, конструкций и методов расчета котельных агрегатов занимались профессор Петербургского технологического института Г. Ф. Делп и профессора МВТУ В. И. Гриневецкий и К. В. Кириш. Их работы нашли продолжение в трудах В. Н. Шретера, предложившего свой метод расчета в 1922 г.

Развитию отечественной теплотехнической науки и совершенствованию стационарной и судовой техники способствовало создание в 1921 г. Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) им. Ф. Э. Дзержинского и в 1927 г. — Центрально котлотурбинного института (ЦКТИ) им. И. И. Ползунова.

Исследованиями теплообмена с помощью теории подобия занимался академик М. В. Кирпичев с учениками. Теплообмен в топках котлов на основе теории подобия изучали А. М. Гурвич и П. К. Конаков. Созданные этими учеными методы расчета были положены в основу капитального труда «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод», впервые выпущенного как результат совместного труда ЦКТИ и ВТИ в 1957 г.

Выдающиеся заслуги в развитии котлостроения в советский период принадлежат академикам М. А. Стыриковичу, М. А. Михееву, Г. Ф. Кнорре, профессорам Л. К. Рамзину, Н. В. Кузнецову, С. С. Кутателадзе и другим ученым.

Разработкой первых учебных курсов по паровым котлам для подготовки инженерно-технических кадров занимались профессора Петербургского технологического института Н. П. Петров (1877 г.) и Харьковского технологического института А. И. Предтеченский (1895 г.). В советский период создавали учебники и учебные пособия для подготовки специалистов в области проектирования и эксплуатации судовых котлов Л. В. Арнольд, В. К. Лысенко, Б. И. Лубочкин, В. В. Лаханин, В. М. Бузник, В. И. Енин, Н. И. Пушкин и другие авторы.

Теория паровых турбин развивалась и совершенствовалась параллельно с улучшением их конструкций. В начале XX в. профессора Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин решили задачу профилирования турбинных лопаток. Разработкой теории паровых турбин в дореволюционный период занимался А. А. Радциг. Он же стал автором первого российского учебника по паровым турбинам.

Первый в России курс паровых турбин был прочитан в 1902 г. в Петербургском технологическом институте. Автором курса являлся профессор Н. А. Быков. К одной из ранних отечественных работ в области судовых турбин относится опубликованный в 1908 г. труд В. И. Афонасьева «Судовые паротурбинные установки».

Большой вклад в становление отечественного турбостроения внес профессор М. И. Гринберг. Создателем школы судового паротурбостроения советского периода является М. И. Яновский, под руководством которого разрабатывались методы прочностного расчета элементов турбин, велась подготовка инженеров. В 1930—1960-х гг. отечественные ученые и конструкторы разработали ряд мощных турбоустановок для кораблей военно-морского флота и крупнотоннажных гражданских судов, в том числе, оборудованных ядерными энергетическими установками.

Учебные курсы и учебники по судовым паровым турбинам для подготовки инженеров-конструкторов и эксплуатационников создавали В. К. Васильев, А. Г. Курзон, А. Г. Верете и другие авторы.

На рубеже XIX—XX вв. в России началось интенсивное развитие ДВС. В области их конструирования и постройки труды отечественных специалистов часто опережали работы ведущих зарубежных фирм. Одновременно с совершенствованием конструкции двигателей велась разработка теоретических основ их работы.

Первую стройную теорию рабочего процесса ДВС в 1906 г. создал профессор МВТУ В. И. Гриневецкий. Его работа, вышедшая в Москве в 1907 г., называлась «Тепловой расчет рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания». Подобные научные методики за рубежом появились после первой мировой войны.

Классическая методика расчета, предложенная В. И. Гриневецким, до настоящего времени используется в учебном процессе и инженерной практике. В советский период она была развита Н. Р. Брилингом, который в 1931 г. опубликовал труд «Исследование рабочего процесса и теплопередачи в двигателе Дизеля», работами ученика Гриневецкого Е. К. Мазинга, академика Б. С. Стечкина, другими учеными-теплотехниками.

Классическая методика характеризуется простотой и наглядной связью основных показателей цикла с конструктивными особенностями двигателя: степенью сжатия, давлением наддувочного воздуха, коэффициентом избытка воздуха и прочими. Однако схематическое описание процессов тепловыделения и теплообмена в цилиндре делает ее непригодной для количественной оценки влияния на показатели рабочего процесса дизеля таких факторов, как угол опережения подачи топлива, период задержки самовоспламенения, характер и продолжительность подачи топлива.

С целью преодоления указанных недостатков, в 1970-х гг. были разработаны новые математические модели рабочих процессов, базирующиеся на замкнутых системах дифференциальных уравнений, описывающих количественную связь между рабочими параметрами, энергообменом и конструктивными особенностями дизеля. В настоящее время наиболее часто при проектировании и исследовании дизелей используют следующие методы математического моделирования: энергетического баланса Б. М. Гончара и объемного баланса Н. М. Глаголева. Ввиду сложности ручного расчета систем дифференциальных уравнений, они решаются численными методами при помощи ЭВМ. Так осуществляется моделирование изменения параметров в цилиндре в замедленном масштабе времени.

Своеобразными трибунами, с которых проводилось обсуждение направлений развития судовых дизелей и теплоходостроения, являлись журналы «Вестник общества морских инженеров», печатавшийся с 1898 г., и издававшийся в начале XX в. журнал «Теплоход». Дискуссии, отражавшие проблемы, волновавшие техническую общественность, в 1930-е гг. велись на страницах журнала «Дизелестроение».

В нем обобщались отечественные научные исследования в области ДВС, приводились статьи, характеризовавшие особенности развития стационарных, транспортных и судовых дизелей во всем мире.

Ряд статей, опубликованных в журнале, носил основополагающий характер. Среди них можно отметить работы Д. Н. Вырубова «Исследование значений различных параметров моторных топлив» (1936 г.), Н. А. Тютчева «Наддув четырехтактных дизелей» (1938 г.) и прочие. Заложенные в этих изданиях традиции затем были развиты в специализированных журналах «Судостроение» (выпускающемся с 1934 г.), «Двигателестроение» (выходящем с 1979 г.) и других.

Подготовка специалистов в области проектирования и эксплуатации транспортных и стационарных ДВС в первом десятилетии XX в. началась в высших учебных заведениях Москвы, Петербурга, Харькова и Киева. Из числа их выпускников впоследствии вышел ряд выдающихся деятелей по исследованию рабочего процесса, разработке конструкции и теории двигателей.

Автором одного из первых учебников «Судовые двигатели внутреннего сгорания», изданного в Санкт-Петербурге в 1913 г., был Б. М. Лобач-Жученко. Учебную литературу, освещавшую вопросы конструирования, основ теории и принципов эксплуатации судовых дизелей в 1920—1930-х гг. создавали Н. И. Колычев, И. А. Немировский и другие. Учебники, написанные В. А. Ваншейдтом, Н. В. Петровским, И. И. Чумаченко широко использовались в учебном процессе при подготовке нескольких поколений судовых инженеров-механиков. В настоящее время активно используются учебники и пособия, написанные С. В. Камкиным, И. В. Возницким, В. И. Самсоновым, Н.И. Худовым и рядом других авторов.

Новые и сложные технические задачи по разработке оригинальных конструкций стационарных и судовых дизелей и организации их производства в 1910—1930-х гг. успешно решались инженерами Р. А. Корейво, С. В. Пугавко, Г. В. Тринклером и другими.

Основателем школы отечественного дизелестроения является профессор В. А. Ваншейдт, долгое время руководивший проектированием судовых дизелей на заводе «Русский Дизель», а затем возглавлявший кафедру ДВС Ленинградского политехнического института. Заметный вклад в развитие методов конструирования судовых дизелей внес профессор Д. Б. Танатар.

Большие заслуги в разработке теории и конструкции отечественных судовых и стационарных двухтактных дизелей имел выдающийся-

ся конструктор и ученый В. Т. Цветков. В 1922 г. он опубликовал работу «Теория двухтактных дизелей», в которой предложил методику расчета процессов продувки и наполнения. В 1920-х гг. на Харьковском паровозостроительном заводе под руководством В. Т. Цветкова начался выпуск судовых компрессорных двухтактных крейцкопфных дизелей. В 1928—1929 гг. там же при его участии был налажен выпуск дизелей по лицензии фирмы «Зульцер».

В 1924—1929 гг. В. Т. Цветков возглавлял работы по созданию бескомпрессорных дизелей, которые увенчались постройкой в 1930 г. машины типа Д40, пригодной для установки на судах. Дизель мощностью 346 кВт стал выпускаться серийно в 1932 г.

Под руководством В. Т. Цветкова велась подготовка научных кадров. Перед Великой Отечественной войной ряд его учеников защитил первые кандидатские диссертации в области ДВС. Научная и инженерная деятельность ученого была обобщена в капитальном труде «Двигатели внутреннего сгорания», вышедшем в 1953 г.

Крупнейшим специалистом в области конструирования быстроходных ДВС являлся профессор А. И. Толстов. В 1933—1935 гг. он выполнил ряд исследований свойств топлив и их влияния на рабочий процесс дизелей, особенностей протекания рабочего процесса. Им велись работы по созданию первых отечественных дизелей с наддувом, изучались процессы воспламенения и горения топлив, в частности, была предложена широко используемая формула для определения периода индукции.

Большой вклад в развитие теории ДВС внесли А. С. Орлин, занимавшийся исследованиями рабочего процесса и газообмена, И. В. Иноземцев, изучавший особенности протекания процесс сгорания, Н. Н. Семенов — создатель цепной теории горения.

В 1930—1940-х гг. в ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова были выполнены исследования свойств отечественных топлив и масел. Там же было проведено серьезное изучение крутильных колебаний, возбуждаемых при работе дизелей. Эти работы были обобщены в трудах М. А. Смирнова «Топливо для дизелей», В. П. Терских «Крутильные колебания судовых установок» (1940 г.) и И. А. Лурье «Крутильные колебания в дизельных установках» (1940 г.).

Признанным специалистом в области ДВС и горюче-смазочных материалов является профессор В. А. Сомов. В его трудах «Справочник по ГСМ в судовой технике», «Смазка судовых дизелей», «Тяжелые топлива для транспортных дизелей» содержатся рекомендации по



проектированию смазочных и топливных систем, расчету оборудования для топливоподготовки и очистке смазочных масел.

Начала теории газовых турбин были заложены в опытах П. Д. Кузьминского и В. В. Караводина. В 1926 г. вышла работа профессора В. М. Маковского «Опыт исследования турбин внутреннего сгорания», во многом определившая направления развития газовых турбин. В 1927 г. инженером Г. И. Зотиков предложен принцип ступенчатого сгорания. В 1933 г. он опубликовал работу «Проблема турбины внутреннего сгорания», в которой сформулировал принципы разработки газотурбинных двигателей. Г. И. Зотиков является пионером внедрения ГТУ в отечественном кораблестроении. Важные теоретические работы в области газотурбинных установок выполнили профессор Г. С. Жирицкий, В. В. Уваров, И. И. Кириллов и другие.

В создании теории горения и в исследовании рабочего процесса, протекавшего в камерах сгорания газовых турбин, важную роль сыграли исследования Н. Н. Семенова, Б. В. Канторовича, А. С. Предводителева, Г. Н. Абрамовича, Д. Н. Вырубова, Л. Н. Хитрина.

Существенный вклад в развитие теории газовых турбин внесли работы Б. С. Стечкина «Газотурбинные установки» и «Теория реактивных двигателей. Лопаточные машины», вышедшие в 1956 г.

Теоретические основы процессов, протекающих в судовых насосах и трубопроводах, впервые разработали члены Петербургской Академии наук Л. Эйлер и Д. Бернулли во второй половине XVIII в. Основное уравнение центробежного насоса непосредственно вытекает из теоретической работы Эйлера «Более полная теория машин, приводимых в действие силою воды». Военный инженер генерал А. А. Саблуков в 1838 г. установил зависимость между производительностью центробежного насоса и частотой его вращения, а также определил область использования подобных устройств. Значительный вклад в развитие теории насосов внесли Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин.

В конце XIX в. были изданы работы В. Г. Шухова «Насосы прямого действия, теоретические и практические данные для расчета их» (1897 г.) и К. П. Худякова «Построение насосов» (1899 г.), определившие направления развития теории поршневых насосов.

Особое значение для создания современной научной базы судовых механизмов имели работы Н. Е. Жуковского «Видоизменение метода Кирхгофа» и «Теория воздушных винтов». В первой излагалось теоретическое обоснование метода расчета подъемной силы крыла, распространяемого ныне на лопасти насосов, вентиляторов и компрессоров.

Вторая работа содержала теорию и метод расчета пропеллеров. Она легла в основу теории осевых вентиляторов, разработанной К. А. Ушаковым и В. П. Ветчинкиным, — учениками Н. Е. Жуковского.

Н. Е. Жуковский является создателем важнейших направлений современной гидроаэромеханики. В 1918 г. он организовал Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), ставший базой для исследований воздушных и гидравлических машин.

В области усовершенствования судовых вспомогательных механизмов плодотворно работали А. Н. Крылов, В. Л. Поздунин, В. Л. Сурвилло и другие ученые. Так, академик В. Л. Поздунин в 1920 г. впервые создал научную методику расчета паровых приводов палубных механизмов. До этого он производился эмпирически.

Интенсивное развитие судоходства и судостроения потребовали разработки правил, регламентирующих устройство и комплектацию судовых механизмов, систем и оборудования. Это диктовалось требованиями обеспечения безопасности мореплавания. Разработка правил постройки судов и контроль за их выполнением возлагались на классификационные общества. Отечественное классификационное общество «Русский Регистр» (ныне Морской Регистр Судоходства) было образовано в 1913 г. Одним из его создателей стал профессор К. П. Боклевский, активный сторонник внедрения дизелей на водном транспорте. Он же в 1902 г. возглавил кораблестроительный факультет Санкт-Петербургского политехнического института и совместно с А. Н. Крыловым создавал учебные планы и программы, разрабатывал новые дисциплины для подготовки отечественных специалистов-судостроителей.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ОСНОВНЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СЭУ

1543 — неподтвержденное упоминание о том, что в гавани Барселоны некий Бласко де Гарай демонстрировал судно, оборудованное гребным колесом с лопастями, вращаемым энергией пара.

1680-е гг. — попытки создания прообразов ДВС, работавших на энергии пороховых газов, предприняты Ж. Готфрейлем, Х. Гюйгенсом и Д. Папеном.

1707 — испытание первого в истории парового судна, построенного французским физиком Д. Папеном.

1736 — постройка англичанином Д. Хуллом первого буксирного судна с пароатмосферной машиной Ньюкомена.

1763 — создание американцем Вильямом Генри паровой лодки.

1773 — испытания парового судна француза д'Оксирона.

1775 — постройка во Франции парохода Перье.

1778 — построено первое паровое судно француза д'Аббана — лодка, оборудованная гребными колесами.

1783 — испытание французского судна «Пироскаф», оборудованного паровой машиной Уатта.

1787 — постройка в Англии Дж. Уилкинсоном первого несамостоятельного судна со стальным корпусом.

1787 — испытания судна американца Дж. Рамсея.

1788 — построен первый пароход англичан Саймингтона и Миллера.

1788 — первое плавание парового катера «Эксперимент», созданного в США изобретателем Дж. Фитчем.

1791 — англичанин Дж. Барбер получил патент на газовую турбину.

1794 — первая официально зарегистрированная попытка создания ДВС. Англичанин Р. Стрит получил патент на атмосферный двигатель, работающий на продуктах сгорания горючей жидкости.

1799 — изобретение французом Ф. Лебоном способа получения светильного газа, использовавшегося в качестве топлива для первых ДВС.

1802 — постройка англичанином Саймингтоном парового буксирного катера «Шарлотта Дандас».

1802 — испытано паровое судно американца Дж. Стивенса, оборудованное гребным винтом.

1803 — испытание первого парохода американца Р. Фултона.

1804 — постройка Дж. Стивенсом судна «Литтл Юлиана», снабженного двумя гребными винтами.

1804 — постройка первой паровой машины двукратного расширения системы англичанина А. Вульфа.

1804 — Дж. Стивенс создал одну из первых конструкций судового водотрубного котла.

1807 — начало коммерческой эксплуатации парохода Р. Фултона «Клермонт» — первого пассажирского судна с механической установкой.

1809 — американское паровое судно «Феникс» совершило первый в истории морской переход по маршруту Нью-Йорк — Филадельфия.

1811 — постройка Ижорским заводом для Кронштадского порта первого в России парового судна технического флота — дноуглубительного снаряда.

1815 — отечественным паровым судном совершен первый морской рейс по маршруту Санкт-Петербург — Кронштадт.

1815 — постройка Р. Фултоном плавучей батареи «Демологос», ставшей первым в мире паровым боевым кораблем.

1816 — создан первый отечественный речной пароход.

1816 — постройка французскими изобретателями братьями Ньепсами опытного судна с двигателем, работавшим на нефти.

1818 — постройка на Ижорском заводе первого отечественного парового военного корабля — балтийского парохода «Скорый».

1818 — разработана первая отечественная паровая компаунд-машина конструкции механика С. Литвинова.

1819 — составлены первые отечественные эксплуатационные судовые документы для парохода «Скорый»: «Опись частей паровой машины с механизмом на судне № 1» и «Опись паровому судну и в нем устройству».

1819 — первый трансатлантический переход парового судна «Саванна» при периодическом действии машины по маршруту Нью-Йорк — Ливерпуль — Санкт-Петербург.

1820 — на р. Волга введен в эксплуатацию первый отечественный буксирный пароход.

1820 — в Николаеве построен пароход «Везувий», ставший первым отечественным паровым судном на Черном море.

1822 — постройка в Англии первого в мире железного парохода «Аарон Мэнби» грузоподъемностью 116 т и скоростью хода 9 узлов.

1823 — постройка англичанином С. Брауном атмосферного двигателя, работавшего на светильном газе.

1824 — С. Карно впервые описал цикл теплового двигателя, работающего с предварительным сжатием атмосферного воздуха.

1827 — начало отечественного коммерческого парового судоходства на Черном море: рейс парохода «Надежда» по маршруту Одесса — Херсон.

1827 — первый переход парохода «Кюрасао» через Атлантический океан из Европы в Америку при кратковременно работающей паровой машине.

1830 — в Санкт-Петербурге на Александровском заводе построен грузопассажирский пароход «Нева», совершивший в этом же году первый в России переход морем вокруг Европы.

1831 — С. Холл получил патент на поверхностный конденсатор пара.

1832 — постройка на Ижорском заводе первой безбалансирной паровой машины, предназначенной для установки на пароход «Геркулес».

1832 — в Санкт-Петербурге в Учебном морском рабочем экипаже начата подготовка механиков для паровых судов. Первый выпуск состоялся в 1834 г.

1834 — на Александровском заводе по проекту А. К. Шильдера построена подводная лодка с металлическим корпусом. Она стала первым русским железным судном.

1834 — первое использование в судовых условиях центробежного вентилятора конструкции генерал-майора А. А. Саблукова.

1835 — открытие в Санкт-Петербурге механических мастерских — предшественника завода «Русский дизель».

1836 — постройка в Англии парохода «Архимед» — первого крупного винтового судна.

1837 — вступил в строй английский пароход «Рейнбоу» — первое морское железное судно.

1838 — первый трансатлантический рейс английского парохода «Сириус» при непрерывно действующей паровой машине.

1838 — успешные испытания на р. Нева первого в мире электрохода, построенного под руководством Б. С. Якоби.

1838 — одна из первых попыток осуществления предварительного сжатия рабочей смеси в двигателе англичанина В. Барнета.

1845 — на Суксунском заводе промышленников Демидовых на р. Кама построено первое в России надводное железное судно.

1848 — введен в строй фрегат «Архимед» — первый российский боевой винтовой корабль.

1850 — создание французом Ж. Бельвилем оригинальной конструкции змеевикового водотрубного котла.

1852 — разработан проект воздушной «калорической машины» Эриксона, ставшей прообразом ГТУ замкнутого цикла.

1858 — реализация процесса сжатия рабочей смеси непосредственно в цилиндре ДВС, осуществленная французом Дегераном.

1862 — французским инженером Бо де Роша предложен четырехтактный цикл, позже легший в основу работы дизельных и карбюраторных двигателей.

1865 — инженер А. И. Шпаковский сконструировал первые в мире форсунку для сжигания жидкого топлива и регулятор давления пара в котле.

1870 — освоено выпуск отечественных минеральных смазочных масел.

1872 — разработана конструкция газовой турбины Штольце, ставшая прообразом современных ГТУ с камерой сгорания.

1878 — в Швеции по проекту Л. Э. Нобеля построен первый в мире морской пароход для перевозки нефтепродуктов «Зороастр» — прототип современных танкеров.

1878 — изобретение англичанином Д. Кларком двигателя, работающего по двухтактному циклу.

1880 — инженером В. Г. Шуховым предложена оригинальная конструкция паровой котельной форсунки.

1881 — построена первая судовая паровая машина тройного расширения.  
1883 — создание шведским изобретателем Г. Лавалем первой паровой турбины реактивного типа.

1883 — профессором Н. П. Петровым разработаны основы гидродинамической теории смазки.

1883 — на миноносце «Взрыв» впервые в России испытан гидравлический привод руля.

1884 — инженер О. С. Костович построил первый в России бензиновый двигатель.

1884 — английский инженер Ч. Парсонс создал первую реально работающую реактивную турбину.

1885 — в Германии Г. Даймлер и В. Майбах запатентовали применение ДВС на малотоннажных судах.

1885 — впервые на отечественном флоте на крейсере «Адмирал Нахимов» использовано электрическое освещение помещений (вместо традиционных масляных фонарей).

1885 — впервые в российском флоте на крейсере «Минин» применены водотрубные котлы системы Бельвиля.

1887 — первое применение паровой турбины на отечественном судне — на волжском пароходе «Луч» для привода электрогенератора использована турбина Парсонса мощностью 18 кВт.

1888 — открытие инженером Н. Г. Славяниновым электрической сварки металлическим электродом.

1888 — в Англии построен первый калоризаторный двигатель системы Дж. Харгривса.

1889 — первое применение электросварки в судостроении: постройка корпуса отечественного речного буксира «Редедя князь Косогский».

1889 — Г. Лаваль создал первую активную паровую турбину.

1891 — появление первых надежных водотрубных секционных котлов.

1892 — инженер П. Д. Кузьминский предложил первую конструкцию турбины радиального типа.

1893 — закончена постройка первого судового прямоточного котла системы Д. И. Артемьева.

1893 — постройка Р. Дизелем первого опытного двигателя с воспламенением от сжатия.

1894 — создание инженером Шенсновичем форсунки с механическим распыливанием топлива.

1895 — на Балтийском заводе начат выпуск отечественных судовых электродвигателей и котлов системы Бельвиля.

1895 — одна из первых попыток применения на судне калоризаторного ДВС: на английском катере установлен двигатель системы «Хорнсби».

1895 — создание Р. Дизелем первого работоспособного двигателя собственной системы (с воспламенением от сжатия).

1896 — создана первая механизированная топка для судового котла, в которой сжигалось твердое топливо (испанское каботажное судно «Эсперанца»).

1897 — демонстрация Ч. Парсонсом первого в мире судна с паротурбинной установкой — яхты «Турбиния».

1897 — начало серийного производства дизелей на заводе в Аугсбурге (Германия).

1897 — в России инженером П. Д. Кузьминским разработана радиальная парогазовая турбина, предназначенная для установки на катер.

1899 — в Санкт-Петербурге на заводе «Людвиг Нобель» начат выпуск отечественных дизельных двигателей.

1900 — американец Ч. Кертис создал паровую турбину со ступенями давления и скорости.

1900 — постройка первых турбинных боевых кораблей — английских контрминоносцев «Вайпер» и «Кобра».

1901 — постройка первого гражданского судна с паровой турбиной (английский пароход «Король Эдуард»).

1901 — на Путиловском заводе в Санкт-Петербурге построен первый дизель с бескомпрессорным распыливанием топлива системы Г. В. Тринклера.

1902 — создание первого в России кораблестроительного факультета при Санкт-Петербургском политехническом институте.

1902 — в Германии создан первый двухтактный двигатель двойного действия конструкции Э. Кертинга.

1903 — первое использование реверсивного дизеля в судовых условиях (небольшая самоходная баржа «Пти Пьер»).

1904 — сдача в эксплуатацию первого в мире крупного теплохода (он же дизель-электроход) «Вандал», предназначенного для перевозки нефтепродуктов по р. Волге.

1904 — приобретение Россией в Англии судна с паровыми турбинами (яхта «Ласточка» — первый отечественный турбоход).

1906 — в Санкт-Петербурге на заводе Л. Нобеля построен первый двухтактный дизель с прямоточно-клапанной продувкой.

1906 — швейцарской фирмой «Зульцер» создан первый дизель с контурной продувкой.

1907 — создан водотрубный котел системы Долголенко-Бельвиля.

1907 — создана первая судовая комбинированная турбопоршневая паровая установка (пароход «Отаки»).

1907 — в Санкт-Петербурге на Металлическом заводе построена первая отечественная паровая турбина.

1908 — на заводе Л. Нобеля собран первый отечественный реверсивный судовый дизель.

1908 — на Коломенском заводе построен первый в мире морской теплоход — танкер «Дело» («Валерий Чкалов»).

1908 — построено первое паротурбинное судно с электропередачей (германское вспомогательное судно «Вулкан»).

- 1909 — в России инженером А. И. Строгановым создан первый в мире утилизационный котел, использующий тепло выпускных газов ДВС.
- 1909 — начат выпуск судовых вертикальных клапанных паровых машин.
- 1909 — построены первые в мире боевые корабли с дизельными энергетическими установками — русские канонерские лодки «Карс» и «Ардаган».
- 1910 — первый мировой съезд дизелестроителей в Санкт-Петербурге.
- 1910 — в Голландии построен первый зарубежный теплоход для морского плавания — танкер «Вулканус».
- 1910 — постройка первой паровой турбины отечественной конструкции.
- 1910 — осуществлена постройка первого отечественного паротурбинного судна — заводского катера «Шалка»).
- 1910 — установка первого турбозубчатого агрегата на гражданское судно — английский турбоход «Веспасиан».
- 1911 — созданы импульсная и изобарная системы газотурбинного наддува двигателей внутреннего сгорания.
- 1911 — построен первый отечественный V-образный дизель.
- 1912 — построен первый полностью уравновешенный дизель типа 15PK6, предназначенный для пассажирских судов типа «Бородино».
- 1913 — фирмами «Виккерс» (Англия) и «Дейц» (Германия) налажен серийный выпуск бескомпрессорных дизелей.
- 1913 — в России построен первый боевой паротурбинный корабль — эскадренный миноносец «Новик», установивший в этом же году мировой рекорд скорости — 37,3 узла.
- 1915 — начало использования дизелей с противоположно-движущимися поршнями в судовых условиях (дизели системы Р. А. Корейво).
- 1915 — фирмой «Зульцер» создан первый экспериментальный двухтактный дизель двойного действия.
- 1916 — на Черном море построен первый в России теплоход для плавания в открытом море — танкер «Баку».
- 1923 — постройка первого судна, оборудованного комбинированными дизель-паровыми двигателями (пародизелями).
- 1925 — создание на заводе «Русский дизель» первого отечественного крейцкопфного малооборотного двигателя типа ДКРВ 41/60.
- 1925 — создан первый отечественный двухтактный бескомпрессорный дизель типа 2050.
- 1925 — первое применение на судне двухтактного дизеля двойного действия, разработанного фирмой «MAN».
- 1926 — первое использование системы импульсного наддува в судовом четырехтактном двигателе.
- 1932 — в Швеции построен первый в мире морской ледокол с дизель-электрической энергетической установкой.
- 1932 — создание отечественного прямооточного парового котла высокого давления системы профессора Л. К. Рамзина.



1932 — фирма «Броун Бовери» разработала первый паровой котел с газотурбинным наддувом.

1933 — в Германии построен паротурбинный катер «Гинденбург» — судно, оборудованное самым маломощным из построенных ТЗА (220 кВт).

1934 — примерный срок окончания строительства компрессорных дизелей (с распыливанием топлива при помощи сжатого воздуха).

1934 — в СССР построен первый отечественный паромотор (быстроходная паровая машина специальной конструкции).

1935 — в Германии начаты первые опыты по использованию в ПТУ гражданских судов пара высоких параметров (5 МПа и 450 °С).

1935 — постройка во Франции первого судна, оборудованного паровыми котлами с газотурбинным наддувом.

1935 — начата эксплуатация первой отечественной судовой пароэнергетической установки со сжиганием пылевидного топлива (пароход «Георгий Димитров»).

1935 — на траулере «Скагерак» установлен один из первых свободнопоршневых генераторов газа.

1936 — фирма «Зульцер» запатентовала канальный способ охлаждения цилиндровых крышек дизелей.

1941 — начало использования в ПТУ промежуточного перегрева пара (турбоход «Экзаминер»).

1946 — постройка первого послевоенного отечественного дизеля типа М50 (12ЧН 18/20).

1947 — начало использования ГТУ как корабельных двигателей: на английском сторожевом катере впервые применена установка авиационного типа.

1949 — начат серийный выпуск отечественных механизированных топков для сжигания твердого топлива (с шурующей планкой).

1951 — построена первая газотурбинная установка для коммерческого судна — английского танкера «Aurig».

1952 — начало применения газотурбинного наддува в судовых двухтактных малооборотных дизелях (импульсный наддув реализован в малооборотной машине типа VTBF фирмы «Бурмейстер и Вайн»).

1955 — первое использование ядерной энергетической установки для боевого корабля — подводной лодки ВМС США «Наутилус».

1959 — начата эксплуатация первого гражданского судна с ядерной энергетической установкой — отечественного ледокола «Ленин».

1959 — построено головное судно серии «Ленинский комсомол» с паротурбинной установкой типа ТС-1.

1960 — начата эксплуатация отечественного судна, оборудованного газотурбинной установкой со свободнопоршневыми генераторами газа — лесовоза «Павлин Виноградов».

1961 — на Брянском машиностроительном заводе начато производство малооборотных дизелей по лицензии датской фирмы «Бурмейстер и Вайн».

1962 — создана первая в мире газотурбинная установка для крупного боевого корабля — большого противолодочного корабля проекта 61.

1967 — постройка первого судна, специально спроектированного для установки на нем ГТУ («Адмирал Каллаган», США).

1968 — построен первый отечественный газотурбоход «Парижская коммуна», оборудованный турбинами с камерами сгорания. Он стал первым в мире коммерческим судном с ГТУ длительного срока службы.

1973 — в конструкциях МОД совершен переход от использования остовов с А-образными стойками к жестким коробчатым сварным отсекам.

1973 — начало использования судовых МОД гидравлического привода открытия выпускного клапана.

1975 — в эксплуатацию сдан первый отечественный супертанкер типа «Крым» с ПТУ, оборудованной промежуточным перегревом пара.

1978 — в МОД с ПКП фирмы «Бурмейстер и Вайн» впервые реализован изобарный газотурбинный наддув.

1979 — начата эксплуатация отечественного ролкера «Капитан Смирнов», снабженного комбинированной газопаротурбинной установкой (ГТУ с ТУК).

1980 — возврат к использованию в судовых котельных установках твердого топлива (угля).

1981 — начало использования турбокомпаундных систем в СЭУ с малооборотными дизелями.

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ  
ПОСТРОЙКИ ПЕРИОДА 1925—1951 гг.**

<b>Тип двигателя, год освоения</b>	<b>Диаметр цилиндра, м</b>	<b>Ход поршня, м</b>	<b>Частота вращения, об/мин</b>	<b>Средняя скорость поршня, м/с</b>	<b>Среднее эффективное давление, МПа</b>
ДКРВ 41/50, 1925	0,410	0,50	180	3,60	0,46
ДКРВ 65/86, 1927	0,650	0,86	125	3,60	0,50
ДКРВ 68/120 (S68, Зульцер), 1930	0,680	1,20	120	4,80	0,46
ДКФ 30/40 (RK30, Зульцер), 1930	0,300	0,40	300	4,00	0,26
ВД 24/38, 1934	0,240	0,38	375	4,75	0,41
ВД 29/50, 1939	0,290	0,50	330	5,50	0,44
ДР 30/50, 1947	0,300	0,50	300	5,00	0,52
ДР 43/61, 1951	0,430	0,61	250	5,08	0,50
50ГРС (GVN50, MAN), 1935	0,345	0,50	215	3,58	0,56
6Ч 23/30, 1938	0,230	0,30	1 000	10,0	0,54

<b>Тип двигателя, год освоения</b>	<b>Эффективная мощность, кВт</b>	<b>Число цилиндров</b>	<b>Удельный расход топлива, кг/(кВтч)</b>	<b>Удельная масса, кг/кВт</b>
ДКРВ 41/50, 1925	552	6	0,258	102
ДКРВ 65/86, 1927	1770	6	0,251	190
ДКРВ 68/120 (S68, Зульцер), 1930	2400	6	0,250	158
ДКФ 30/40 (RK30, Зульцер), 1930	147	4	0,258	82
ВД 24/38, 1934	176	4	0,254	40
ВД 29/50, 1939	478	6	0,250	54
ДР 30/50, 1947	552	6	0,250	37
ДР 43/61, 1951	1470	8	0,250	40
50ГРС (GVN50, MAN), 1935	272	6	0,250	95
6Ч 23/30, 1938	330	6	0,245	12

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ  
НА ПЕРВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕПЛОХОДАХ  
(1904—1916 гг.)**

Судно, год постройки	Тип двигателя	Диаметр цилиндра, м	Ход поршня, м	Частота вращения, об/мин
«Сармат», танкер, 1904	Нобель, четырёхтактный	0,32	0,42	240
«Вандал», танкер, 1904	Поляр-Нобель, четырёхтактный	0,29	0,43	240
«Дело», танкер, 1908	Коломенский, четырёхтактный	0,45	0,68	200
«Эмануил Нобель», танкер, 1909	То же	0,49	0,74	150
«Великоросс», колесный буксир, 1909	То же	0,45	0,68	200
«К. В. Хагелин», танкер, 1910	То же	0,49	0,74	150
«Осетин», колесный буксир, 1910	Нобель, четырёхтактный	0,33	0,38	270
«Бородино», пассажирское речное судно, 1911	Коломенский, четырёхтактный	0,41	0,50	240
«Баку, танкер», 1916	Крупн, двухтактный	0,48	0,80	140

Судно, год постройки	Средняя скорость поршня, м/с	Среднее эффективное давление, МПа	Эффективная мощность, кВт	Число цилиндров
«Сармат», танкер, 1904	3,36	0,49	133	4
«Вандал», танкер, 1904	3,44	0,518	88	3
«Дело», танкер, 1908	4,53	0,472	340	4
«Эмануил Нобель», танкер, 1909	3,70	0,527	368	4
«Великоросс», колесный буксир, 1909	4,53	0,476	258	3
«К. В. Хагелин», танкер, 1910	3,70	0,527	368	4
«Осетин», колесный буксир, 1910	3,41	0,503	147	4
«Бородино», пассажирское речное судно, 1911	4,00	0,557	442	6
«Баку, танкер», 1916	3,73	0,420	850	6

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДИЗЕЛЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПЕРВЫХ ТЕПЛОХОДАХ  
ЗАРУБЕЖНОЙ ПОСТРОЙКИ (1909—1912 гг.)**

<b>Судно, год постройки</b>	<b>Тип двигателя</b>	<b>Диаметр цилиндра, м</b>	<b>Ход поршня, м</b>	<b>Частота вращения, об/мин</b>
«Якут», Россия, винтовой буксир, 1909	Полар, двухтактный	0,25	0,37	240
«Vulcanus», Голландия, танкер, 1910	Веркспур, четырёхтактный	0,40	0,60	175
«Romagna», Италия, грузовое судно, 1911	Зульцер, двухтактный	0,31	0,46	230
«Quevilly», Швеция, танкер, 1911	MAN, двухтактный	0,25	0,35	300
«Suescia», Швеция, 1912	Бурмейстер и Вайн, четырёхтактный	0,50	0,66	140
«Selandia», сухогруз, Швеция, 1912	То же	0,53	0,73	140
<b>Судно, год постройки</b>	<b>Средняя скорость поршня, м/с</b>	<b>Среднее эффективное давление, МПа</b>	<b>Эффективная мощность, кВт</b>	<b>Число цилиндров</b>
«Якут», Россия, винтовой буксир, 1909	2,96	0,405	118	4
«Vulcanus», Голландия, танкер, 1910	3,50	0,513	338	6
«Romagna», Италия, грузовое судно, 1911	3,53	0,450	239	4
«Quevilly», Швеция, танкер, 1911	3,50	0,430	220	6
«Suescia», Швеция, 1912	3,10	0,490	589	8
«Selandia», сухогруз, Швеция, 1912	3,41	0,440	662	8

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ,  
УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПЕРВЫХ ТЕПЛОХОДАХ  
ЗАРУБЕЖНОЙ ПОСТРОЙКИ (1909—1912 гг.)**

(продолжение)

<b>Судно, год постройки</b>	<b>Тип двигателя</b>	<b>Диаметр цилиндра, м</b>	<b>Ход поршня, м</b>	<b>Частота вращения, об/мин</b>
«Rolandseck», Германия, 1912	Текленбург-Карелс, двухтактный	0,51	0,92	125
«Vascoi», США, танкер, 1912	Макинтош-Сеймур, четырёхтактный	0,42	0,61	190
«Elbruz», танкер, 1914	Веркспур, четырёхтактный	0,60	1,00	125
«Annam», Дания, 1913	Бурмейстер и Вайн, четырёхтактный	0,60	0,80	125

<b>Судно, год постройки</b>	<b>Средняя скорость поршня, м/с</b>	<b>Среднее эффективное давление, МПа</b>	<b>Эффективная мощность, кВт</b>	<b>Число цилиндров</b>
«Rolandseck», Германия, 1912	3,83	0,38	883	6
«Vascoi», США, танкер, 1912	3,86	0,46	368	6
«Elbruz», танкер, 1914	4,16	0,39	680	6
«Annam», Дания, 1913	3,33	0,51	956	8

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Акимов П. П.** Судовые силовые установки. — Л.: Морской транспорт, 1952. — 508 с.
2. **Акимов П. П.** История развития судовых энергетических установок. — Л.: Судостроение, 1966. — 187 с.
3. **Акимов П. П.** Первые паровые установки для судов // Судостроение. — 1978. — № 10. — С. 84—86.
4. **Акимов П. П.** Первые судовые паровые котлы // Судостроение. — 1981. — № 11. — С. 55—57.
5. **Акимов П. П.** Первые силовые паротурбинные установки советского транспортного флота // Морской флот. — 1973. — № 1. — С. 50—51.
6. **Артемов А. Г.** Совершенствование судовых газотурбинных установок. — Л.: Судостроение, 1984. — 240 с.
7. **Ахматов А. С.** Николай Павлович Петров // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 241—244.
8. **Бауман Н. Я., Яковлев М. Н., Свечков И. Н.** Технология производства паровых и газовых турбин. — М.: Машиностроение, 1973. — 464 с.
9. **Белобородов В. А.** Современные дизели судов малого тоннажа. — Л.: 1941. — 198 с.
10. **Белькинд Л. Д.** Александр Ильич Шпаковский (1823—1881) // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 161—165.
11. **Бережных О. А.** Самые большие корабли: С древнейших времен до наших дней. — Л.: Судостроение, 1985. — 125 с.
12. **Бережных О. А.** К 100-летию создания первого работоспособного дизеля // Судостроение. — 1994. — № 5-6. — С. 51—55.
13. **Богданов Б. В.** Первенцы теплоходостроения (К 75-летию постройки теплохода «Вандал») // Судостроение. — 1978. — № 12. — С. 56—59.
14. Брянскому машиностроительному заводу — 120 лет // Судостроение. — 1993. — № 10. — С. 47—49.
15. **Будницкий И. М.** Иван Августович Тиме // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 253.
16. **Бурыйшкін Л. П., Лысенко В. К., Швед А. П.** Эксплуатация судовых паросиловых установок. — Л.: Морской транспорт, 1951. — 416 с.
17. **Венцель С. В.** Применение смазочных масел в ДВС. — М., 1979. — 240 с.
18. **Верете А. Г.** Судовые паровые турбины. — Л.: Морской транспорт, 1959. — 407 с.
19. **Виргинский В. С.** Иван Иванович Ползунов. 1729—1766 / Отв. ред. Н. К. Латман. — М.: Наука, 1989. — 165 с. (Научно-биографическая литература).
20. **Возницкий И. В.** Двигатели и силовые установки современных рыбопромысловых судов. — М.: Морской транспорт, 1959. — 202 с.

21. **Генриот Э.** Краткая иллюстрированная история судостроения / Пер. с нем. — Л.: Судостроение, 1973. — 192 с.
22. **Головин Ю. И.** Первый адмиралтейский пароход «Скорый» // Судостроение. — 1991. — № 1. — С. 69—72.
23. **Гуревич А. М.** Газотурбинный наддув судовых парогенераторов. — Л.: Судостроение, 1975. — 96 с.
24. **Гуревич А. М., Зинин В. И., Колесниченко А. Г., Нагибин А. Я., Пильдиш В. Г.** Основные направления развития судовых паровых котлов // Судостроение. — 1990. — № 6. — С. 21—25.
25. **Данилевский В. В.** Василий Иванович Калашников (1849—1908) // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 375.
26. **Душин К. Ю.** Развитие судовой энергетики // Судостроение. — 1994. — № 8—9. — С. 36—39.
27. **Енин В. И.** Судовые парогенераторы. — Л.: Судостроение, 1975. — 272 с.
28. Журнал «Судостроение» пятьдесят лет назад // Судостроение. — 1987. — № 8. — С. 45.
29. Журнал «Судостроение» пятьдесят лет назад // Судостроение. — 1987. — № 5. — С. 43.
30. **Залесский Н. А.** Первый танкер, построенный в Николаеве // Судостроение. — 1980. — № 9. — С. 56—57.
31. **Зильберштейн А. Б.** Первые теплоходы на Черном море // Судостроение. — 1974. — № 4. — С. 66—68.
32. **Зинин В. И., Колесниченко А. Г., Косматенко А. Г., Нагибин А. Я.** Морские котлы с газотурбинным наддувом — этапы и перспективы развития // Судостроение. — 1993. — № 4. — С. 9—12.
33. **Иоффе А. Е.** «Вандал», «Дело» и другие... // Человек, море, техника. — Л.: Судостроение, 1988. — 376 с.
34. **Калугин А.** Возвращение угля // Морской флот. — 1981. — № 6. — С. 44.
35. **Карцев В. П., Хазановский П. М.** Тысячелетия энергетики. — М.: Знание, 1984. — 224 с.
36. **Кириллин В. А.** Страницы истории науки и техники. — М., 1986. — 512 с.
37. **Климовский С. Д.** Крейсера «Европа», «Азия», «Африка» // Судостроение. — 1993. — № 11—12. — С. 66—71.
38. **Котляр И. В.** Судовые газотурбинные установки. — Л.: Судостроение, 1967. — 284 с.
39. **Кудряцев П. С., Конфедератов И. Я.** История физики и техники. — М., 1960. — 507 с.
40. **Курзон А. Г.** Судовые паровые и газовые турбины. Конструкции. — Т. 1. Турбоагрегаты. Турбины. — Л.: Судпромгиз, 1958. — 303 с.
41. **Ларионов И. Д., Беляев И. Г.** Вспомогательные турбинные и котельные установки морских судов. — М.: Транспорт, 1988. — 224 с.
42. **Лаханин В. В.** Судовые паровые котлы. — Л., 1952. — 495 с.
43. **Лаханин В. В.** Судовые паровые машины. — М., 1960. — 343 с.



44. **Левин Р. Е.** Теплотехника. — М., 1951. — 433 с.
45. **Лисичкин С. М.** Александр Александрович Летний // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 365—369.
46. **Лобач-Жученко Б. М.** Школа теплоходного механика и судового моториста. — М.—Л.: ОГИЗ Трансиздат, 1932. — 498 с.
47. **Лобач-Жученко Б. М.** Судовые двигатели внутреннего сгорания. — СПб., 1913.
48. **Лубочкин Б. И.** Морские паровые котлы. — М.: Морской транспорт, 1963. — 608 с.
49. **Мазинг Ю. А.** Карл Андреевич Шильдер. 1785—1854. — М.: Наука, 1989. — 128 с. — (Научные биографии).
50. **Маликов И. В.** Современные паровые турбины морских судов. — М.: Морской транспорт, 1960. — 375 с.
51. **Марков Н. М., Цукерман Р. В.** Павел Дмитриевич Кузьминский // Люди русской науки. — М.: Наука, 1965. — С. 271—277.
52. **Махов Г.** Со дна моря — в музей // Морской флот. — 1982. — № 3. — С. 62.
53. **Мельников Р. М.** Крейсер «Варяг». — Л.: Судостроение, 1983. — 288 с.
54. **Милтон Д. Х., Лич Р. М.** Судовые паровые котлы / Пер. с англ. — М.: Транспорт, 1985. — 295 с.
55. **Моравский А. В., Файн М. А.** Огонь в упряжке, или как изобретают тепловые двигатели. — М.: Знание, 1990. — 192 с.
56. **Насосы.** Справочное пособие / Бадеке К., Градевальд К.-Х., Кельнер К. — М.: Машиностроение, 1979. — 502 с.
57. **Ногид Л. М.** Промысловые суда. — Л.: Судпромгиз, 1935.
58. О чем писали старинные морские журналы // Морской флот. — 1970. — № 10. — С. 13.
59. О чем писали старинные морские журналы // Морской флот. — 1973. — № 6. — С. 22.
60. Опыт эксплуатации и пути совершенствования судовых энергетических установок / Г. Е. Каштылянов // Рыбн. хоз-во. Сер. Техн. экпл. флота. Судостроение: Информ. пакет / ВНИЭХР. — 1993. — Вып. 9. — 32 с.
61. Очерки истории техники в России / Под ред. А. И. Артоболевского. — М.: Наука, 1973. — 404 с.
62. Паровой бот на Неве // Судостроение. — 1990. — № 11. — С. 49.
63. **Плаксионов Н. П., Верете А. Г.** Судовые турбинные установки. — М.: Транспорт, 1973. — 272 с.
64. **Поленов Л. Л.** Крейсер «Аврора». — Л.: Судостроение, 1987. — 264 с.
65. Речное судоходство в России / М. Н. Чеботарев, М. Д. Амусин, Б. В. Богданова и др. — М.: Транспорт, 1985. — 352 с.
66. **Румб В. К.** Становление советского дизелестроения // Судостроение. — 1992. — № 3. — С. 63—66.
67. Семинар по вопросам эксплуатации и развития газотурбинных установок транспортных судов // Судостроение. — 1989. — № 10. — С. 18—20.

68. Совершенствование судовых энергетических установок / Г. Е. Каштылянов, В. М. Сергеев // Рыбн. хоз-во. Сер. Техн. экпл. флота. — Судостроение: Информ. пакет / ВНИЭХР. — 1993. — Вып. 2. — 37 с.
69. **Сомов В. А., Ишук Ю. Г.** Судовые многотопливные двигатели. Л.: Судостроение, 1984. — 240 с.
70. **Сомов В. А., Бенуа Г. Ф., Шепельский Ю. Л.** Эффективное использование моторных масел на речном флоте. — М.: Транспорт, 1985. — 231 с.
71. **Становой А. А.** О понятии «номинальные силы» // Судостроение. — 1981. — № 6. — С. 62—64.
72. **Степанов Ю. Г., Цветков И. Ф.** Эскадренный миноносец «Новик». — Л.: Судостроение, 1981. — 224 с.
73. Судовые энергетические установки / Г. А. Артемов, В. П. Волошин, Ю. В. Захаров, А. В. Шквар. — Л.: Судостроение, 1987. — 480 с.
74. Судостроительная тематика в книге рекордов Гиннеса // Судостроение. — 1993. — № 5—6. — С. 42—43; № 7. — С. 52—53.
75. **Сурвилло В. Л.** Палубные механизмы. — Л.: Судпромгиз, 1937.
76. **Танатар Д. Б.** Современные мощные судовые дизели. — Л.: Морской транспорт, 1958. — 182 с.
77. **Тихонов В. И., Захаров А. М.** Легкие газотурбинные установки быстроходных судов. — М.: Транспорт, 1973. — 136 с.
78. **Троицкий Б. Л., Сударева Е. А.** Основы проектирования судовых энергетических установок. — Л.: Судостроение, 1987. — 152 с.
79. **Усов В. Ю.** Моторный миноносец «Видный» // Судостроение. — 1974. — № 7. — С. 59—60.
80. Флот рыбной промышленности. Справочник типовых судов / Отв. ред. В. Е. Астахов. — Л.: Транспорт, 1972. — 244 с.
81. **Фролов С.** Использование отработанного тепла судовых дизелей. — ОГИЗ Трансиздат, 1931.
82. **Хмельников П. С.** Теплосиловое оборудование судов. — Л.: Судпромгиз, 1952. — 455 с.
83. **Цветков И. Ф.** Гвардейский крейсер «Красный Кавказ». — Л.: Судостроение, 1990. — 264 с.
84. **Цветков И. Ф.** Линкор «Октябрьская революция». — Л.: Судостроение, 1983. — 240 с.
85. **Цветков В. С.** Речные колесные суда // Судостроение. — 1987. — № 9. — С. 57—58.
86. **Шапиро Л. С.** Самые быстрые корабли. — Л., 1981. — 160 с.
87. **Шапиро Л. С.** Сердце корабля. — Л.: Судостроение, 1990. — 144 с.
88. **Шишкин В. А.** Анализ неисправностей и предотвращение поврежденный судовых дизелей. — М.: Транспорт, 1986. — 192 с.
89. **Шляхтин П. Н.** Паровые турбины. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 234 с.
90. **Шретер В. Н.** Паровые котлы. — Л.: ГОНТИ, 1938. — 420 с.

91. Эксплуатация судовых дизель-двигателей / Под ред. И. А. Немировского. — М.: Государственное транспортное издательство, 1934. — 496 с.
92. **Яковлев Л. М.** Маломощные двухтактные двигатели тяжелого топлива. — М., 1951. — 339 с.
93. MAN—B&W. Engine Selection Guide. MC Programme 1991. Two-stroke Engine. — Copenhagen, 1991. — 144 p.
94. Motorship Manual and Register of Motorvessels.— New York, 1928.— 336 p.
95. Motorship Year Book. — New York, 1925. — 128 p.
96. Shell Marine Seminar. October 1991. — London, 1991. — 80 p.
97. The motorship Reference Book for 1929.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Принятые сокращения .....	6
Глава 1. <b>Первые суда с пароэнергетическими установками</b> .....	7
Глава 2. <b>Развитие судовых паровых котлов</b> .....	39
Глава 3. <b>Судовые паровые машины</b> .....	119
Глава 4. <b>Судовые паротурбинные установки</b> .....	152
Глава 5. <b>Первые двигатели внутреннего сгорания</b> .....	195
Глава 6. <b>Развитие судовых дизелей</b> .....	216
Глава 7. <b>Судовые газотурбинные установки</b> .....	303
Глава 8. <b>Судовые вспомогательные механизмы</b> .....	339
Глава 9. <b>Вклад отечественных ученых в развитие судовой энергетики</b> .....	356
Приложения .....	367
Литература .....	379

Учебное издание

Сергей Витальевич Гаврилов

### **Судовые энергетические установки. История развития**

В авторской редакции

Набор, верстка, оригинал-макет С. В. Гаврилова

Лицензия ИД № 02187 от 30.06.2000 г.

Подписано в печать 30.02.2003 г. Формат 61×86/16. Печать офсетная  
Авт. л. 25,78. Усл. печ. л. 23,28. Уч.-изд. л. 28,4. Тираж 145 экз. Заказ 104

Редакционно-издательский отдел Камчатского государственного  
технического университета

Отпечатано ЧП «Оперативная полиграфия»  
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ленинская, 46