

Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки

Е.Б. Гильмияров, В.В. Цветков

Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

Аннотация. Проанализирована история формирования основных критериев, определяющих современный подход к комплектации судовой энергетической установки.

Abstract. The history of formation of basic criteria defining a modern approach to vessel power plant choice has been analyzed. The conclusion has been made that the approach should be polycriterial.

1. Введение

Проблема выбора типа и мощности привода для движения речного или морского судна насчитывает много столетий. Задолго до начала нашей эры мощность биологического двигателя (гребцов) пытались связать с необходимым числом весел, но решить эту проблему только за счет увеличения размерений судна не удалось, т.к. длинные деревянные суда просто разваливались на штормовой волне.

Выход был найден в строительстве относительно коротких кораблей с несколькими вертикальными рядами (ярусами) весел. Гребные корабли античных государств Средиземноморья (Греция, Карфаген, Рим, Финикия) именовались по числу ярусов весел на каждый борт: униремы (1 ряд); биремы (2 ряда); триеры или триремы (3 ряда); квинкваремы (4 ряда); пентеры (5 рядов). У македонского царя Деметрия Полиоркета (337-283 гг. до н.э.) широко применялись корабли с 6 и 7 ярусами весел.

Поиски наилучшего сочетания грузоподъемности судна, скорости его движения и мощности "**биологической СЭУ**" продолжались несколько сотен лет. В конечном счете, наиболее эффективной оказалась **трирема**, судно водоизмещением ок. 200 тонн, которая обеспечивала ход на чистой воде до 7 узлов (13 км/час) при использовании не более 170-180 гребцов. На триреме применялись три яруса весел, в среднем по 30 на борт, длиной от 6 до 10 м, а паруса использовались только при попутном ветре.

Именно в этот период (ок. 300-200 гг. до н.э.) формулируется **первый критерий** выбора судовой "энергетической" установки. Поскольку грузоподъемность и скорость всегда являлись исходными данными для проектирования судна, этим критерием стала **минимизация "экипажа машинного отделения"**, т.е. численности гребцов.

В начале новой эры началась специализация гребного военного флота, разделившая его на ударный (линейный или тяжелый), формируемый из 50-вёсельных пентер и более маневренный и высокоскоростной (крейсерский) флот из бирем и **либурн**. Либурны – двухмачтовые униремы, были заимствованы римлянами у далматинских пиратов и не только полностью вытеснили триремы из Средиземного моря, но и стали прототипом византийских дромонов и норманнских драккаров, несколько столетий контролировавших побережье Европы и Северной Африки.

Таким образом, появился **второй критерий** выбора типа энергетической установки – **обеспечение наилучшей маневренности судна**, т.е. способности быстро изменять скорость и направление его движения. В VII в. опыт строительства парусно-гребного флота был обобщен в Венеции, после чего появляются галеры, универсальные (река-море) парусно-гребные суда водоизмещением 180-200 т., сохранившие скорость и грузоподъемность трирем в сочетании с маневренностью либурн. Движение галеры обеспечивали до 140 гребцов при одном ярусе из 24-25 весел и одномачтовым (с XVI в. двухмачтовым) "косым" парусным вооружением.

Галеры наиболее полно отвечали известным к тому времени критериям выбора типа СЭУ: **максимальная маневренность при минимальной численности экипажа** и применялись на европейском флоте вплоть до середины XVIII века, т.е. больше 1000 лет.

Первое исключительно парусное судно – **одномачтовый ганзейский когг**, водоизмещением около 200 т, для управления которым требовалось от 40 до 50 палубных матросов, появилось после **изобретения в XIII веке кормового руля**, навешиваемого на петлях к ахтерштевню судна. До этого для осуществления управления движением на парусно-весельных судах использовались гребцы и кормовые весла управления, которые не только существенно ограничивали допустимую грузоподъемность судна, но и делали его игрушкой волн при малейшем волнении моря.

Высокая экономическая эффективность коггов способствовала интенсивному развитию в Европе парусного судостроения: **двухмачтовых нефов** во Франции и **трехмачтовых каракк** в Средиземном море. Каракки и нефы были прочными, но тихоходными и плохо приспособленными для движения против ветра судами. Наиболее эффективными, с точки зрения сочетания маневренности и грузоподъемности судна, стали каравеллы.

Каравелла, или каракка малых размеров, несла один прямой парус на фок (передней) мачте, а на остальных латинские (правильнее – арабские) "косые" или треугольные паруса, что позволяло судну лавировать против ветра. Водоизмещение типовых каравелл не превышало 50-160 т, однако малая численность экипажа (до 40-50 человек) в сочетании с совершенствованием технологий парусного управления судном (ветровой энергетики) позволили перейти к морскому, а затем и океанскому судоходству.

Появление судов, не требующих непрерывного пополнения запасов пищи и воды, привело к формированию **третьего критерия** выбора СЭУ – **автономности мореплавания**, т.е. длительности пребывания судна в море без пополнения запасов провизии и пресной воды, дополненных в XIX в. запасами топлива, а в XX в. – запасами воздуха (для подводных судов). Автономность лучших гребных судов античности с экипажем до 250 человек и водоизмещением около 200 т не превышала двух-трех суток, а первые парусники сразу подняли планку автономности до нескольких недель.

Кроме того, выход мореплавателей за пределы береговой зоны потребовал формирования **четвертого критерия** выбора "энергетической установки" – **обеспечение заданной мореходности судна**, т.е. независимости от ветра и волнения моря. До появления чисто парусного флота взаимосвязь судоходства с атмосферными условиями (за исключением температуры воздуха) практически не рассматривалась, т.к. гребные суда просто пережидали непогоду в прибрежных бухтах.

Зависимость парусных судов от направления и силы ветра долго сдерживала развитие мореплавания. Постепенное выравнивание шансов парусников и галер началось только после изобретения в начале XIV в. морской артиллерии, возможности которой при ее размещении вдоль бортов парусного судна многократно превышали аналогичные возможности галер.

К середине XVIII в. оснащенные артиллерией парусники полностью вытеснили гребной флот, а многовековое соперничество биологической и ветровой энергетики закончилось в пользу последней. Таким образом, задача выбора типа "судовой энергетической установки (СЭУ)" до паровой эры была кардинально решена путем полного отказа от использования весельного привода.

2. Паровая энергетика на флоте

Становление современной судовой энергетики стало результатом изобретения механического привода для движения судна, что стимулировалось судовладельцами, желающими обойти зависимость парусных судов от метеоусловий, в частности, от направления ветра. Для речных судов, не использующих весельный привод, отказ от ветровой зависимости имел определяющее значение и **в начале первого тысячелетия н.э.** в Китае стали широко применять **бортовые гребные колеса**, вращаемые быками, что обеспечивало достаточно эффективную скорость движения речного судна против течения. В Европе первый патент на использование бортовых колес для движения судна получил в конце 1578 г. Дэвид Рамсей (David Ramsay), но первый колесный паром, приводимый в движение лошадьми, начал эксплуатироваться в Британии (графство Чатем/Chatham) только в 1682 г.

2.1. Первые судовые механические движители

Впервые способ движения судна без использования мускульной силы людей, животных, энергии ветра или движущей воды был упомянут в индийском манускрипте Бхагхкара (Bhaskara, 1155 г.), однако никаких технических подробностей о принципе его реализации там не приведено. Аналогичным образом судовой механический привод описал францисканский монах, преподаватель Оксфордского университета Роджер Бэкон (ок.1214-1292 гг.): "... Можно создать крупные речные и океанские суда без гребцов, управляемые одним рулевым и передвигающиеся с большей скоростью ..."

Первое документальное свидетельство практического применения пара для движения судна было найдено в архиве военно-морских сообщений Каталонии за 1543 г. Капитан испанского флота Бласко де Гарей (Blasco de Garay's) предложил королю Карлу V "машину для передвижения больших лодок и кораблей даже при спокойной погоде без весел или парусов". Машина была установлена на 200-тонном зерновозе "Троица" ("Trinity", капитан Peter de Scarza), и 17 июня 1543 г. в порту Барселоны были проведены испытания, на которых присутствовали губернатор Генри де Толедо (Henry de Toledo) и казначей двора, вице-канцлер и интендант Каталонии Педро де Кордова (Pedro de Cordova).

Капитан де Гарей не объяснил принципа работы своего механизма: видно было только, что там был большой медный котел с кипящей водой и вращающиеся колеса по бортам судна. В сообщении королевских наблюдателей говорилось, что легкость установки "машины" и достаточно высокая скорость

движения судна против ветра (ок. 0,7 узла) могли бы быть одобрены для применения на флоте, но не рекомендовались ввиду ее высокой стоимости и опасности разрушения судна при взрыве парового котла.

В XVII веке неоднократные попытки конструирования различных механизмов для движения судов предпринимали Thomas Grent (1632 г.), Francis Lin (1637 г.), Edward Ford (1640), Thomas Toogood (1661 г.) и Edward Somerset (1667 г.). Однако все эти изобретения не выходили за рамки воспроизведения галерной схемы весельного привода и никогда не были применены на практике.

В XVIII в., точнее в 1736 г., англичанин Джонатан Халлс (Jonathan Hulls) впервые патентует "судно или транспорт, способное двигаться в любой гавани, порту или реке при отсутствии ветра и против течения". Детальная схема судна, предназначенного для буксировки парусных судов в гавани (портовой буксир), была приведена в брошюре, изданной спустя год.

В своем патенте Д. Халлс впервые в Европе описал способ преобразования поступательного движения поршня парового двигателя во вращательное движение бортовых колес, названный впоследствии кривошипно-шатунным механизмом (КШМ). Патент предусматривал использование двигателя Ньюкомена, однако низкая мощность и громоздкость пароатмосферной машины не позволили реально осуществить этот проект.

2.2. Пароходостроение

Эпоху практической паровой энергетики открывает маркиз де Аббанс (Claude Francois Jouffroy d'Abbans, Франция), построивший в 1774 г. деревянный пароход с бортовым колесным приводом. Однако отсутствие достаточно мощного двигателя не позволило его судну двигаться по воде исключительно с помощью пара. **Первый работоспособный колесный пароход "Пироскаф" ("Pyroscaphe")** маркиз де Аббанс построил в **1783 г.**, установив на речной барже балансирную машину Уатта. На испытаниях, проведенных на реке Соны вблизи Лиона (Saone, Lyons), "Пироскаф" 15 минут двигался против течения с грузом в 182 т, однако производительность парового котла оказалась слишком низкой для более продолжительного движения.

Появление понятия **судовая энергетическая установка (СЭУ)**, объединяющего паровой двигатель, газотрубный котел и судовой колесный привод, связывается с именем американского инженера и изобретателя Дж. Фитча (John Fitchs), открывшего в 1790 г. первую регулярную пароходную паромную линию на реке Делавер (Delaware) длиной 8 миль (12,9 км.). Эра энтузиастов парового движения на флоте продолжалась вплоть до начала эксплуатации парохода Роберта Фултона (Robert Fulton) **"Клермонт" ("Clermont")** водоизмещением ок. 100 тонн и паровой машиной Уатта в 24 л.с. (1807 г.).

Р. Фултон неоднократно подчеркивал, что его пароход ничем особенным не отличался от своих более ранних предшественников, но именно "Клермонт" доказал эффективность парового судостроения, дав в первый год эксплуатации прибыль в 16000 долларов, что на порядок превысило доходность всех действующих в США речных пароходных переправ. Увеличение тоннажа парохода относительно судов Дж. Фитча примерно в 3 раза, а мощности паровой машины в 2,4 раза положило конец эпохе энтузиастов парового движения и стало фактором экономического развития страны.

Эпоху промышленного пароходостроения открывает Николай Джеймс Рузвельт (Nicholas James Roosevelt), построивший в 1811 г. по проекту Фултона первый серийный пароход "Новый Орлеан" ("New Orleans"), предназначенный для грузоперевозок по рекам Огайо и Миссиссипи. В 1813 г. в Питтсбурге заработали два его завода по производству паровых двигателей. Через год к Новому Орлеану было приписано 20 пароходов, а к 1835 г. на Миссиссипи и ее притоках работало 1200 пароходов, оснащенных паровыми машинами с заводов Н.Рузвельта.

Начало промышленного пароходостроения в XIX в. привело к формированию **пятого критерия** оценки эффективности судовой энергетической установки – **дешевизна и технологичность (простота) массового производства судовых двигателей**. Появление нового критерия стало результатом многолетнего, в том числе и экономического, соперничества на флоте ветровой и паровой энергетики.

Так, например, стоимость парохода "Новый Орлеан" дедеветом ок. 200 т составляла около 40000 долларов США, что было почти в два раза дороже аналогичного парусника, т.к. затраты на установку мачт и парусов были существенно ниже стоимости паровой машины, усиления корпуса и размещения емкостей для хранения запасов угля.

2.3. Гребной винт и железное судостроение

Следующий этап развития судовых силовых установок практически полностью был посвящен решению задачи восстановления на новой (паровой) базе мореходных характеристик парусных судов.

Главной причиной, тормозившей развитие парового судостроения, стала ограниченная прочность дерева, используемого при конструировании остова судна. Недостатки дерева, как конструкционного материала для новой судовой энергетики наиболее явно проявились во время

испытаний первого парохода Фултона весной 1803 г., когда на небольшой волне днище судна просто проломилось, а взятая в долг машина, вместе со всем оборудованием, пошла ко дну.

Первую цельнометаллическую баржу (длина 21,5 м., водоизмещение ок. 200 т.) для перевозки грузов по каналам построил в 1787 г. англичанин Дж. Уилкинсон, задолго до появления на флоте паровых машин Уатта, после чего сторонники деревянного судостроения стали утверждать, что из-за соли железное судно проржавеет в течение нескольких лет, а кроме того, на нем не сможет работать компас.

Первый железный колёсный пароход "Вулкан" (Великобритания) был спущен на воду в 1818 г., но развитие "железного судостроения" началось только после начала интенсивной колонизации Австралии, Индии и Китая во второй половине XIX века. Основным побудительным мотивом для перехода на металл как основу судостроения стал резкий рост объемов строительства военного и транспортного флота, что привело к быстрому истощению европейских запасов строевой древесины, которую до применения необходимо было сушить более 20 лет.

Вторым фактором, препятствующим распространению морского пароходостроения, являлась высокая зависимость судового колесного привода от осадки, встречного ветра и волнения моря, что привело к выработке у морской администрации мнения о пригодности пароходов только для речного судоходства и вспомогательного портового флота. Недостатки колесного привода наиболее явно проявились в первом рейсе вокруг Европы, совершенном в 1830-1831 гг. русским пароходом "Нева" (225 т, 2×40 л.с.). Выйдя 17 августа 1830 года из Кронштадта, "Нева" прибыла в Одессу 4 марта 1831 г., затратив на рейс 199 суток. Длительность рейса объяснялась продолжительными стоянками в портах из-за сильных зимних штормов.

Необходимость преодоления зависимостей парохода от метеоусловий на морском паровом флоте (четвертый критерий выбора СЭУ) привела к появлению на флоте гребных винтов, полезный упор которых на порядок превышал эффективность колесного привода, и мало зависел от волнения моря, водоизмещения судна и направления ветра. Первый патент на судовой гребной винт получил Джозеф Брамах (Joseph Bramah, UK) 9 мая 1785 г., но его работающая конструкция была создана почти через десять лет.

В 1796 г. Дж.Фитч строит паровой катер с кормовым гребным винтом ("Collect"), но, несмотря на то, что судно прошло на пробных рейсах в Нью-Йоркской гавани более 1000 км, изобретение оказалось потерянным после смерти его автора. В 1804 и 1805 гг. американец Джон Стевенс (John Stevens) вновь воспроизводит винтовую схему движения судна, построив одно- и двухвинтовые паровые баркасы, отработавших на речных переправах несколько лет.

В 1829 г. инженер из Богемии И. Рессель (Joseph Ressel), на п/х "Циветта" (Civetta) водоизмещением 48 т впервые объединяет **железный корпус и кормовой гребной винт**. На испытаниях, проведенных в Триесте, судно развило скорость 6 узлов, но ввиду несовершенства двигателя и активного противодействия морской администрации дальнейшие опыты не производились, а железные суда с винтовым гребным приводом оказались востребованными только после появления регулярных океанских грузовых маршрутов, связывающих Европу с Америкой, Австралией и Азией (Индия, Китай).

В 1839 г. в Великобритании были построены первые достаточно большие винтовые суда, пригодные для коммерческого использования: "Архимед" ("Archimedes") и "Роберт Стоктон" ("Robert F. Stockton"). Однако решение об исключительном применении на судах кормовых гребных винтов Британское адмиралтейство приняло только после проведения в 1845 г. сравнительных испытаний винтового ("Rattler") и колесного ("Alecto") шлюпов, со всей очевидностью доказавших преимущество гребных винтов.

2.4. Океанское пароходостроение

Эпоху **океанского пароходостроения** открывают британские колесные пароходы "Сириус" ("Sirius") и "Великий Запад" ("Great Western"), совершившие в 1838 г. первые безостановочные трансатлантические рейсы без использования парусов. Открытие пароходом "Великий Запад" регулярной паровой линии между Нью-Йорком и Бристолем (Ливерпулем) опровергло существовавшую до этого точку зрения о невозможности рентабельных грузоперевозок при загрузке парохода топливом для длительного плавания, после чего начинается постепенное вытеснение парусников с основных торговых маршрутов. В 1843 г. спускается на воду первый железный винтовой пароход "Великобритания" (SS "Great Britain"), открывший эпоху океанских **паровых винтовых судов с железным корпусом**.

В 1859 г. в Великобритании строится самый большой железный колесно-винтовой пароход XIX века "Великий Восток" ("Great Eastern"), водоизмещением 24000 т и **автономностью, соизмеримой с линейным парусным флотом**. Судно предназначалось для грузоперевозок между Великобританией и Австралией и позволяло обеспечить транспортировку 4000 человек без захода в порты для пополнения запасов угля, продовольствия и воды. Однако низкая эффективность использования топлива сделала пароход малорентабельным для грузопассажирских перевозок. Судовладельцев спасло от финансового краха только то, что "Великий Восток" оказался единственным судном, способным принять на борт груз в 5000 т, обеспечив тем самым прокладку в 1865 г. первой трансатлантической телеграфной линии в 2700 миль.

Почти все паровые военные и гражданские суда почти 70 лет сохраняли полное или частичное парусное вооружение, т.к. капитаны не желали полагаться на незнакомую им паровую машину. Конец строительству пароходов с сохранением парусного вооружения положила трагическая катастрофа башенного рангоутного броненосца HMS "Captain" ("Кептен"), перевернувшегося в 1870 г. во время внезапно налетевшего шквала. Прекращение использования парусов поставило перед судостроением задачу **установления гарантированной наработки двигателя на отказ**, а перед моряками – задачу планирования технического обслуживания и ремонта СЭУ.

Следующие десятилетия XIX в. связаны с интенсивным развитием классического пароходостроения, пределом совершенствования которого стали линейные суда серии "Океаник" (Oceanic), строительство которых началось на Ирландских верфях в 1870 г. Суда оснащались паровыми машинами с тройным расширением пара и примерно за 7 дней пересекали Атлантику. Вплоть до начала XX в. паровые двигатели играли ведущую роль в транспортном машиностроении и примерно за 100 лет прошли путь от одноцилиндровых двигателей мощностью 2-10 л.с., до многоцилиндровых двигателей мощностью до 5000 л.с. и несколькими ступенями расширения пара. Последним примером массового применения паровых машин на флоте стала серия из 2751 военно-транспортных пароходов США проекта ЕС2 (1941-1947 гг.), получивших название "Либерти" ("Liberty").

Почти столетний период развития на флоте двигателей Уатта (конец XVIII – начало XX вв.) был направлен на реализацию ранее сформулированных требований для СЭУ на паровой технологической базе, причем понятие автономности было дополнено топливной составляющей. Итогом развития пароходостроения стало формирование **двух новых критериев выбора СЭУ: минимизация стоимости ее производства и максимизация надежности главного двигателя.**

2.5. Двигатель Стирлинга

Невысокий коэффициент полезного действия (КПД) паровых двигателей (4-6 %) существенно уменьшал полезную грузоподъемность паровых судов и стимулировал поиск более эффективных методов топливоиспользования. Первую попытку в этом направлении сделал изобретатель гребного винта, американский инженер шведского происхождения Джон Эрикссон (John Ericsson), построивший в 1853 г. колесный пароход "Ericsson" с двигателем, изобретенным в 1812 г. шотландским священником Стирлингом (Stirling).

Теоретический КПД двигателей Стирлинга многократно превосходил эффективность парового двигателя, но использование в качестве рабочего тела горячего воздуха не позволяло реализовать все преимущества цикла Стирлинга, так воздух является хорошим изолирующим материалом с малой удельной теплоемкостью. Двигатель занимал почти четверть объема парохода, но развивал мощность всего в 250 л.с., в то время как на океанских пароходах сопоставимых размерений использовались двигатели в 2000 л.с.

После ряда испытаний Эрикссон понял, что для обеспечения необходимой экономичности двигатель должен работать на давлениях, недоступных для технологий XIX века. Именно тогда был сформулирован **седьмой критерий выбора типа главного двигателя СЭУ – минимизация его массогабаритных характеристик**, т.е. отношения его мощности к массе двигателя.

Промышленное производство двигателей Стирлинга, работающих на давлениях от 50 до 200 бар с использованием в качестве теплоносителя водорода и гелия, стало возможным только во второй половине XX века, например, Stirling Engine V4-275R Mk III.

2.6. Паровые турбины

Попытки создать более эффективную и компактную паровую машину не прекращались с момента создания первых паровых двигателей, и в 1857 г. американский инженер, адмирал Бенжамин Франклин Изервуд (Benjamin Franklin Isherwood), патентует морскую паротурбинную установку (ПТУ). В 1870 г. несколько ПТУ устанавливаются на фрегаты береговой охраны серии USS "Wampanoag", но, несмотря на относительно высокую скорость судна (до 18 уз.), одноступенчатые паровые турбины оказались не намного более эффективными, чем паровые машины, т.к. их КПД не превышал 6-8 %.

Массовое внедрение паротурбинной энергетики на транспорте и промышленности стало возможным только после изобретения в 1884 г., сэром Чалзом А. Парсонсом (Sir Charles Algernon Parsons), многоступенчатой паровой турбины (10 л.с., 18 000 об/мин., КПД 15-18 %). В 1893 г. Парсонс основывает компанию морских паровых турбин ("Marine Steam Turbine Company") и предлагает Британскому Адмиралтейству построить судно с новым типом парового двигателя.

Первый турбоход водоизмещением 44,5 т с многоступенчатой паровой турбиной – "Турбиния", был заложен 2 августа 1894 г., а в 1896 г. начинаются его ходовые испытания. После почти годичной доводки и переделки пропульсивного комплекса на трехвинтовую схему судно показало максимальную скорость в 34,5 узла (ок.61 км/час) при мощности СЭУ в 2300 л.с.

Появление турбоходов открывает эпоху конкуренции паровых турбин и паровых машин, что привело к формированию **восьмого критерия** выбора СЭУ – **максимальной эффективности использования энергетических возможностей топлива**. До появления паровых турбин сравнивать топливную эффективность паровых машин Уатта было просто не с чем.

Верхом совершенствования гражданского паротурбинного судостроения начала XX в. стали турбоходы "Мавритания" ("Mauretania") и "Лузитания" ("Luisitania"), с 1907 г. работавшие на линии Ливерпуль – Нью-Йорк. При мощности ПТУ в 73 000 л.с. суда водоизмещением ок. 32 000 т развивали скорость от 25 до 26 узлов (ок. 42 км/час), что до их создания считалось невозможным.

Последним достижением классических ПТУ на военном флоте стали принятые в 1943 г. на вооружение военно-морских сил США линкоры класса "Айова" ("Iowa", водоизмещение 55 250 т, мощность ПТУ – 212 000 л.с., скорость 33 узла).

Современный этап развития паротурбинной энергетики на флоте начинается после 21 января 1954 г., точнее, после спуска на воду первой подводной лодки с ядерной паро-производящей установкой (ЯППУ) "Наутилус" (USS "Nautilus", SSN-571), которая впервые позволила обеспечить практически неограниченную дальность мореплавания, после чего моря и океаны становятся "тесными" для современного флота.

3. Судовая энергетика XX века

Паровые СЭУ конца XIX в. требовали наличия двух элементов, обеспечивающих движение судна: парового котла и двигателя. Переход от угля на котельный мазут позволил существенно сократить объемы, необходимые для хранения запасов топлива, но проблема наличия на судне двух отделений и, соответственно, команд – котельной и машинной – не могла быть решена при использовании двигателей внешнего сгорания. Стремление избавиться от парового котла и связанных с ним технических и технологических проблем привело к появлению на флоте **судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС)**.

3.1. Первые "нефтяные" двигатели

Практический опыт эксплуатации первых ДВС, использующих легко испаряющиеся сорта топлива, продемонстрировал их высокую опасность при применении в замкнутом пространстве, что привело к необходимости создания двигателей, работающих на нетоксичных и невзрывоопасных сортах топлива. Кроме того, для применения ДВС на транспортном флоте требовались машины мощностью в сотни и тысячи л.с. Первым шагом в этом направлении стала разработка двигателей, работающих на керосине. Принципиально они мало отличались от двигателей Отто, однако впрыск топлива в них осуществлялся насосом после предварительного подогрева керосина с целью перевода его в газообразное состояние.

В 1888 г. англичанин Джемс Харгрэвс построил прототип двигателя, работающего на тяжелом топливе с форсункой, запальным шаром и камерой сгорания, охлаждаемой водой, а в 1890 г. Акройд Стюарт (Ackroyd Stuart) получает патент на так называемый "калоризаторный" двигатель. В 1892 г. фирма "Горнсби и сыновья" начинает выпуск двигателя, работающего на тяжелом топливе, который получил название – двигатель "Горнсби-Акройда".

Основываясь на опыте создания нового двигателя, немецкий инженер Рудольф Дизель (Rudolf Diesel) предлагает в 1892 г. создать тепловую машину с максимальным приближением рабочего процесса к изотермическому циклу Карно. Свою идею он оформляет патентом "Метод и аппарат для преобразования высокой температуры в работу".

В 1893 г. Р. Дизель заключает с компанией братьев Зульцер (Sulzer Brothers Ltd) первое соглашение о производстве своих двигателей, а в 1894 г. подписывает контракт с компанией "Бурмейстер и Вайн" ("Burmeister and Wain", B&W, Copenhagen) о создании на базе компании экспериментальной базы по проектированию и изготовлению новых двигателей.

Впоследствии Р. Дизель отказался от идеи создания изотермического двигателя и на базе адиабатного процесса строит в 1896 г. промышленный образец двигателя с воспламенением топлива от сжатия (патент США № 608 845 от 9 августа 1898 г.). На испытаниях, проведенных в феврале 1897 г., двигатель мощностью 20 л.с. показал **КПД на уровне 34 %**, в то время как эффективность лучших паровых турбин того времени не превышала 15-16 %.

3.2. Дизельные двигатели на флоте

Внедрение ДВС на флоте начинается после строительства в 1895 г. американским инженером Джоном П. Голландом (John P. Holland) подводной лодки (ПЛ) "Holland VII". На этой ПЛ Д. Голланда подводный ход обеспечивал работающий от аккумуляторов электропривод постоянного тока, а для зарядки аккумуляторов и движения в надводном положении впервые был применен бензиновый двигатель внутреннего сгорания. Следующая ПЛ "Holland VIII" (1900 г.) с мощностью нефтяного ДВС в 50 л.с. до 1914 г. была образцом подводного судостроения.

В 1903 г. в России было построено первое достаточно крупное дизельное судно – самоходная нефтеналивная колесная баржа "Вандал" ("Vandal"), предназначенная для перевозки каспийской нефти в Санкт-Петербург. В 1904 г. строится дизельная самоходная винтовая баржа "Сармат", у которой **суточный расход топлива** не превышал **1,15 т сырой нефти**, тогда как пароход аналогичных размеров и мощности сжигал до 6,5 т угля. Кроме того, за счет сокращения штата машинной команды, в частности, полного сокращения кочегаров, были значительно снижены эксплуатационные расходы. Энергетическую установку теплохода река-море "Сармат" обслуживали всего шесть человек: машинист, его помощник и четыре масленщика, что было сопоставимо с численностью машинной команды типовых речных пароходов США.

Существенное увеличение грузоподъемности судов с дизельными двигателями привело к тому, что суда с паровыми турбинами оказались эффективными только при сочетании достаточно большой мощности и дедвейта судна, что было характерно только для линейных кораблей военного флота и гражданских пассажирских судов.

Выполнение всех известных к этому времени критериев выбора типа СЭУ, в сочетании с физико-химической безопасностью применяемого топлива, способствовало массовому внедрению ДВС на флоте, а владельцы торговых и рыболовных судов начали постепенно переходить на использование более эффективных тепловых машин, получивших название дизельный двигатель, или дизель. В настоящее время дизеля занимают доминирующее положение на флоте и, вероятно, сохранят его и в обозримом будущем.

Основные показатели современных малооборотных (МОД), среднеоборотных (СОД) и высокооборотных (ВОД) судовых дизелей:

- удельная масса МОД: 20-35 кг/кВт, СОД: 13-18 кг/кВт, ВОД: 5-6 кг/кВт;
- агрегатная мощность МОД до 100 МВт, СОД до 25 МВт;
- удельный расход топлива МОД 150 г/кВт час, СОД 175 г/кВт час;
- удельный расход масла МОД 0,4 г/кВт час, СОД 0,6-0,8 г/кВт час.

Современные дизеля работают на тяжёлых, т.е. более дешевых сортах топлива, имеют достаточно низкий расход топлива, а с учетом утилизации тепловых потерь КПД достаточно мощных МОД может достигать до 55%.

Существующий типоразмерный ряд МОД и СОД позволяет выбрать источник пропульсивной мощности для любого существующего и перспективного судна или двигатель электростанции из двигателей одного типа с различным числом цилиндров и частотой вращения. Не ограничены дизеля и единичной агрегатной мощностью. Так, фирма Napag Lloyd в 2005 г. заказала 3 контейнеровоза с дизелями мощностью по 93400 э.л.с., обеспечивающих скорость судна до 25,2 уз. (*Новости, события...*, 2005).

3.3. Газотурбинные установки на флоте

К середине XX века паровые машины на гражданском флоте были практически полностью замещены двигателями внутреннего сгорания, а паротурбинные установки, в основном ЯППУ, сохранились только на военном флоте. Новым достижением судовой энергетики стало появление в 50-х годах XX в. судов с газотурбинными энергетическими установками (ГТУ).

Первый практический газотурбинный двигатель (ГТД) с турбиной радиального действия создал в 1892 г. инженер-механик российского военного флота капитан-лейтенант Павел Дмитриевич Кузьминский, практически одновременно с началом работ по созданию первого дизельного двигателя. Новый двигатель, получил название "газопарород" и был установлен на речном катере. После успешных испытаний ГТУ П.Д. Кузьминский начинает готовить свой двигатель к показу на Всемирной выставке в Париже, но его неожиданная смерть в 1900 г. выводит на первое место двигатель Рудольфа Дизеля.

История практического применения ГТУ на флоте начинается в 1943 г., после заключения компанией "Metropolitan-Vickers", разрабатывающей ГТД для британской реактивной авиации, контракта на разработку морской версии их двигателя. В 1946 г. проводятся успешные испытания катера MGB 2009, на котором в ходе ремонта дизельный двигатель был заменен газовой турбиной, что примерно при том же объеме и весе почти вдвое увеличило мощность СЭУ.

Первый корабль с ГТУ был принят на вооружение британского флота в 1947 г. В 1949 г. газовые турбины мощностью в 4500 л.с. были впервые установлены на тепловозах тихоокеанской линии США, а в 1953 г. начались эксперименты по их применению в автомобилестроении. Внедрение ГТД на флоте привело к расширению области применения реактивных движителей и появлению на флоте судов с динамическими принципами поддержания (ДПП), в частности экранопланов, судов на воздушной подушке (СВП) и судов на подводных крыльях (СПК).

3.4. Преимущества и недостатки СЭУ с ГТУ

Главным достоинством ГТД является высокая эксплуатационная надежность и низкий удельный вес (4-6 кг/кВт час), что меньше, чем у современных ВОД. Агрегатная мощность современных ГТУ

достигает 30 МВт (в перспективе 50 МВт), а вероятность безотказной работы в течение эксплуатационно-ремонтного цикла (ЭРЦ) – 0,9999 (Корытов, 2004).

К числу основных преимуществ судовых газотурбинных установок относятся:

- высокий уровень готовности и возможность комплексной автоматизации СЭУ;
- возможность быстрой агрегатной замены ГТД (на замену требуется 4-6 часов);
- незначительные расходы на текущее обслуживание и ремонт (Корытов, 2004).

Немаловажное значение играет высокая манёвренность ГТУ, допускающая возможность сброса и наброса 100 % нагрузки без ограничения по времени. Для сравнения: современные форсированные дизеля со средним эффективным давлением более 20 бар допускают наброс 100 % нагрузки только постепенно или не менее чем за 4 ступени по 25 %.

Главными недостатками ГТД являются более высокий, чем у ДВС, удельный расход топлива и относительно низкий моторесурс двигателя, что в сочетании с его высокой стоимостью существенно сдерживают внедрение ГТУ на коммерческом флоте.

В настоящее время морские газовые турбины наиболее широко применяются на крупнотоннажном пассажирском флоте, т.е. на судах с достаточно высоким уровнем окупаемости, либо на военных кораблях, для которых высокий уровень удельной мощности и эксплуатационной надежности имеют определяющее значение.

3.5. Электродвижение на флоте

Судовые гребные электрические установки (ГЭУ) прошли относительно недолгий путь, начавшийся в 1836 г. с создания русским академиком Борисом Семеновичем Якоби первого в мире электрохода – катера с гребными колесами, которые вращал электродвигатель, питавшийся от батареи гальванических элементов. Однако скорость судна, в силу малой эффективности колесного движителя и низкой энергоемкости первых аккумуляторов, составила менее 1,5 узлов, что надолго сдержало развитие электродвижения на флоте.

Внедрение ГЭУ на флоте началось с появления первых подводных лодок с электродвижением. В конце гражданской войны в США (1860-1863 гг.) инженер Олститт строит первую ПЛ, подводный ход которой обеспечивался электродвигателями, работающими от батареи гальванических элементов, а надводный – паровой машиной. Однако маломощный источник электроэнергии не обеспечивал приемлемой дальности и скорости плавания в подводном положении, и лодка получила статус учебно-исследовательского судна. Только после начала промышленного производства свинцово-кислотных аккумуляторов (1883-1884 гг.) и установке в 1895 г. на ПЛ "Holland VII" ДВС для надводного хода начинается постепенное развитие электродвижения на флоте.

Появление ПЛ дополнило понятие автономности **длительностью движения судна без использования атмосферного воздуха**, что надолго предопределило военное применение ГЭУ на флоте. Однако высокие массогабаритные показатели ГЭУ, существенно превосходящие чисто механическую передачу, в сочетании с **гибкостью выработки и распределения мощности** привели к развитию электродвижения на гражданском флоте.

Во второй половине XX в. ГЭУ начинают широко применяться на ледоколах и судах ледового плавания. В порядке наработки опыта эксплуатации строятся транспортные и рыболовные суда с ГЭУ, но двойное преобразование химической энергии топлива в механическую, а затем в электрическую при относительно небольшом КПД гребных двигателей и генераторов (0,75-0,85) существенно ограничило область распространения ГЭУ.

3.6. Современные ГЭУ

Современный этап развития электродвижения на флоте стал возможен благодаря повышению КПД передачи электроэнергии от первичного двигателя (например, дизель-генератора), на винт до 99 % и интенсивному развитию силовой кремниевой электроники. Так, например, применение тиристорных преобразователей частоты большой мощности позволяет увеличить диапазон применения гребных двигателей с пониженной (двойной) частотой вращения и соосных винтов, т.е. увеличить КПД судовой силовой установки на 25 % и 15 %, соответственно (Рибинраут, Бурбаева, 1999).

В настоящее время оптимальной является ГЭУ переменного тока с непосредственным преобразованием частоты и напряжением не ниже 6,3 кВ. В качестве движительного комплекса может быть принята традиционная система "Азипод" (Касаткин, Романовский, 1999) или винторулевые колонки (Иванов, Самсыгин, 1999).

Немаловажную роль в развитии электродвижения играет тот факт, что использование электрической передачи мощности к движителю позволяет расширить диапазон применения ГТД в составе ГЭУ переменного тока с частотными преобразователями, что значительно увеличивает маневренность транспортных и рыболовных судов.

В работе (Башаев, 2004) был проведен сравнительный анализ эффективности энергетической установки танкера типа "Астрахань" (дедвейт ок. 20 000 т, МОД 8850 кВт) с аналогичным танкером с ГЭУ с винторулевым комплексом (ВРК) типа "Азипод", в составе четырех ГТД контейнерного типа (по 2,5 МВт), работающих на сеть переменного тока.

Проведенный анализ показал, что применение такой установки позволяет:

- повысить манёвренность судна и уменьшить массу пропульсивной установки на 180 т, сократив при этом длину машинного отделения на 5-7 м, т.е. увеличить объём грузовых помещений примерно на 500 м³;
- за счет возможности вывода из работы отдельных силовых агрегатов снизить расход топлива при ходе на чистой воде;
- отказаться от практики технического обслуживания ГД СЭУ и перейти на агрегатную замену блоков ГТУ во время планового ремонта, т.е. сократить численность персонала машинного отделения судна.

Положительные результаты аналогичного подхода были получены в 1994 г. после замены на двух танкерах ОАО "Мурманское морское пароходство" СЭУ с МОД и прямой передачей на винт на ГЭУ с единой электростанцией из четырех главных дизель-генераторов и пропульсивным комплексом "Азипод".

При этом необходимо отметить, что, кроме ледоколов, достаточно широкой областью применения ГЭУ являются паромы и суда внутреннего плавания, эксплуатируемые в "особых" районах, такие, как балтийский паром "Тихо Браге" ("Tycho Brahe"), с энергетической установкой из 4-х двухтопливных дизелей Wärtsilä 6R32 с электрической передачей мощности на винт (Laurilehto, 2001).

Для судов с сопоставимым расходом энергии на движение и собственные нужды наиболее перспективными являются СЭУ с отбором мощности на валогенераторы, в том числе установки переменного и двойного рода тока. Немаловажное преимущество ГЭУ связывается с возможностью отказаться от применения сложных в эксплуатации и более дорогих винтов регулируемого шага (Рассолов, Романовский, 1992).

В качестве перспективного направления развития электродвижения наибольший интерес представляют практические приложения использования эффекта сверхпроводимости, позволяющего создать электромеханические установки с криодвигателем. Двигатели и генераторы с большой агрегатной мощностью, высоким КПД и малыми массогабаритными характеристиками позволяют высвободить на наливных и сухогрузных судах от 15 до 20 % полезного объёма, а улучшенная виброакустика может существенно изменить подход к проектированию жилых помещений на судне (Жемчугов и др., 2000).

В целом появление на флоте СДВС, ГТУ и ГЭУ не только продолжило линию повышения автономности судна и улучшения массогабаритных характеристик СЭУ, но и привело к формированию нового **девятого критерия выбора типа СЭУ – максимизации гибкости выработки и распределения мощности**.

С этой точки зрения интересный подход к реализации СЭУ танкера дедвейтом 16 400 т, построенного в Китае в 2003 г., предложила фирма Вяртсиля (Финляндия). В состав СЭУ входит главный двигатель W6L46 мощностью 6300 кВт (500 об/мин.) и обратимый валогенератор мощностью 1500 кВт. В состав электростанции суммарной мощностью 2380 кВт: дизель-генератор W6L20 и два W4L20. Редукторный механизм передачи мощности на винт Wärtsilä Gear SCV116-SDCT и винт регулируемого шага Wärtsilä CP130 (диаметр 5400 мм) обеспечивают следующие режимы работы СЭУ:

- экономичный ход, скорость судна 14,7 узлов, мощность ГД 5300 кВт (500 об/мин.), валогенератор работает в режиме отбора мощности, на электростанцию поступает 400 кВт (1200 об/мин.), на гребной вал передается 4900 кВт (107 об/мин.);
- форсированный ход, скорость судна 16 узлов, мощность ГД 6300 кВт (500 об/мин.), валогенератор переводится в режим электродвигателя, от электростанции на валогенератор поступает 700 кВт (1200 об/мин.), на гребной вал передается 7000 кВт (107 об/мин.);
- аварийный ход, скорость судна 7-10 узлов, источник мощности только электростанция, валогенератор переводится в режим электродвигателя, от электростанции на валогенератор поступает 1500 кВт (1200 об/мин.), на гребной вал передается 1500 кВт (75,2 об/мин.).

4. Новые технологии в современном двигателестроении

Большинство прототипов современных судов и их энергетических установок были созданы в конце XIX и первой половине XX века. Со второй половины XX века в судостроении преобладала тенденция качественного совершенствования известных технологий, и только в конце XX – начале XXI в. начинается дальнейшее развитие судостроения. В немалой степени это было связано с необходимостью восстановления промышленной базы, разрушенной в ходе второй мировой войны. К началу XXI века формируются следующие основные направления развития новых технологий на морском флоте:

В судостроении: снижение металлоёмкости и трудоёмкости строительства судна; расширение области применения новых материалов, в том числе пластиков и металлокерамики; создание наиболее комфортных санитарно-гигиенических условий проживания для экипажа и пассажиров.

В двигателестроении: повышение эксплуатационной надежности технических средств, обеспечивающих безопасность мореплавания; повышение эффективности использования природных ресурсов, включая решение экологических проблем.

Рассмотрим три наиболее интенсивно развивающиеся технологии в современном двигателестроении.

4.1. Экология

19 мая 2005 г. вступило в силу Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78, ограничивающее для дизельных двигателей выбросы вредных веществ в атмосферу (окислов азота и серы).

Снижение выбросов оксидов серы практически полностью обеспечивается применением низкосернистого топлива. Так, в "особых" районах плавания содержание серы в топливе не должно превышать 1,5 %, а вне "особых" районов может достигать 4,5 %.

Более сложной является технология снижения выброса в атмосферу окислов азота (NO_x). Для ограничения содержания его выброса с выхлопными газами судовых дизелей применяются следующие методы (в скобках указан процент снижения выбросов азота):

- изменение фаз газораспределения и топливоподачи (до 35 %), изменение конструкции топливной аппаратуры, включая внедрение систем прямого впрыска воды в цилиндр (до 50-60 %), увлажнение воздуха для горения и применение водотопливных эмульсий (до 20-30 %);
- применение специальных систем очистки выхлопных газов (до 85-90 %), при этом стоимость эксплуатации селективного катализатора составляет от 1 до 2,5 долларов на 1000 кВт·час и определяется пропорционально требуемой степени очистки;
- применение двухтопливных двигателей, имеющих возможность работать на газовом и жидком топливе.

Все эти способы прошли апробацию на основных типах ДВС и показали отсутствие негативных последствий для деталей движения и остова двигателя.

4.2. Электронные системы управления СДВС

Последним достижением в дизелестроении, доведённым до промышленного применения, являются МОД с электронной системой управления (ЭСУ).

В настоящее время известны три производителя МОД, которые предлагают на рынке двигатели с ЭСУ: MAN B&W (двигатели серии ME); Wärtsilä (двигатели типа Sulzer RT-flex); Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (двигатели типа UEC-Eco).

Для СОД и ВОД проектно-конструкторскими работами в этом направлении занимаются Wärtsilä (типоразмер двигателей W32, W38, W46) и Caterpillar – MaK (программа ACERT).

У двигателей с ЭСУ традиционный механический привод органов газораспределения и топливоподачи заменён гидравлическими сервомоторами с применением электрических распределительных клапанов с компьютерным управлением. Управляющие сигналы для гидравлических систем высокого давления, включающих силовые насосы, трубопроводы (коллекторы), гидравлические толкатели и распределительные клапаны с электрическим управлением, вырабатываются микропроцессорными электронными блоками.

Программное обеспечение для системы управления разрабатывается проектантом дизеля. Для функционирования управляющих микропроцессорных блоков поступают сигналы от датчиков угла поворота коленчатого вала и датчиков обратной связи с исполнительными устройствами. Оптимальный для конкретных условий плавания режим работы дизеля, например, режим наибольшей экономичности или минимального выброса в атмосферу окислов азота, может быть выбран со специального пульта управления (Иванов и др., 2004).

18 сентября 2001 г. завершились ходовые испытания египетского балкера "Gypsum Centennial" дедвейтом 47950 тонн. Это первое судно в мире, на котором установлен главный малооборотный двигатель с ЭСУ. Мощность двигателя Sulzer6RT-flex58T-B 11275 кВт при 93 об/мин. (Fankhauser, 2001). К январю 2004 г. двигатель наработал уже более чем 12000 часов без существенных проблем, хотя несколько первых месяцев устранялись "детские" болезни (Huber, 2003).

Малооборотные двухтактные дизеля с ЭСУ в последние годы начинают завоёвывать всё более прочные позиции на рынке. Так, например, к февралю 2004 г. в эксплуатации находилось 83 двигателя Sulzer RT-flex производства фирмы Wärtsilä с общим количеством цилиндров 763 и суммарной мощностью 3,57 млн кВт, а до конца 2004 г. были подписаны контракты на постройку более 20 двигателей с ЭСУ. Таким образом, можно ожидать широкого распространения МОД с ЭСУ для применения на флоте.

Применение вместо механического электронного способа управления топливоподачей даёт следующие преимущества:

- повышает гибкость системы управления и оптимизирует характеристики двигателей на различных эксплуатационных режимах;

- снижает массу и упрощает конструкцию двигателя за счёт отказа от громоздких и достаточно сложных механических приводов систем топливоподачи, газораспределения и реверса;
- улучшает пуско-реверсивные характеристики, включая совершенствование подачи контровоздуха для уменьшения выбега судна;
- улучшает маневренные характеристики судна за счёт снижения минимальной частоты вращения (в настоящее время достигнута минимальная частота вращения ГД с прямой передачей на винт 12 об/мин);
- уменьшает выброс окислов азота за счёт изменения параметров топливоподачи и некоторого снижения экономичности при плавании в ограниченных акваториях;
- за счёт оптимизации процесса сгорания, учитывая режим работы двигателя и внешние условия, обеспечивает высокую экономичность и низкую эмиссию NO_x при использовании различных сортов топлива;
- оптимизирует процесс управления системой цилиндровой смазки, что позволяет снизить расход цилиндрового масла при одновременном уменьшении износов цилиндрических втулок.

4.3. Утилизация вторичных энергоресурсов

Утилизация тепла уходящих газов и охлаждающей воды считается одним из наиболее эффективных способов повышения эффективности топливоиспользования на флоте. В последние годы на российском флоте начали эксплуатироваться суда зарубежной постройки, на которых в котельных установках и системах обогрева применяются высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ, "Thermal oil" – термомасла или "Thermal fluid" – термальные жидкости) (Костылев, Смольник, 1996).

Основанием для применения в судовой энергетике минеральных (на нефтяной основе) и синтетических высокотемпературных теплоносителей стали их уникальные эксплуатационные характеристики:

- отсутствие коррозионной активности к стали;
- низкая температура застывания (до -55°C), обеспечивающая безопасность работы системы практически в неограниченном диапазоне температур наружного воздуха;
- независимость рабочей температуры от давления, определяемого, главным образом, гидравлическим сопротивлением системы, что позволяет доводить температуру терможидкостей до 350°C без повышения давления. В традиционном водяном теплообменнике для предотвращения вскипания воды при температуре 300°C требуется поддерживать давление на уровне 8,6 МПа;
- сохранение агрегатного состояния среды при всех рабочих температурах, что упрощает управление и позволяет суммировать теплоту разнопотенциальных источников, работающих при переменных нагрузках, т.е. создавать многоконтурные системы циркуляции терможидкостей с различными температурами. Так, например, в единый контур циркуляции могут быть введены теплообменники, установленные за утилизационным паровым котлом, главными и вспомогательными двигателями.

В современных СЭУ терможидкости, обеспечивающие судно тепловой энергией, используются следующим образом:

- вся тепловая энергия вырабатывается только в результате нагрева терможидкостей в контурах охлаждения СДВС;
- отдельные потребители тепловой энергии, например, системы паротушения, подогрева и пропаривания танков, обогрева забортных отверстий и др., используют пар от парогенератора, обогреваемого терможидкостью из контуров охлаждения СДВС;
- часть потребителей тепловой энергии используют пар, вырабатываемый в парогенераторах, а остальные – терможидкость из парового теплообменника и контуров охлаждения СДВС.

Начало строительства дизельных двигателей с ЭСУ и внедрение утилизационных систем с терможидкостями не привело к выработке дополнительных критериев выбора СЭУ, т.к. их применение связано только с количественным улучшением ранее определенных показателей ее эффективности.

Следствием развития в двигателестроении новых технологий стало появление на флоте экологических требований к СЭУ, что привело к формированию **десятого критерия выбора типа судового привода – минимизации загрязнения воздушной и водной среды.**

При этом необходимо отметить, что последний критерий выбора СЭУ, скорее всего, появился в результате ужесточения конкурентной борьбы на рынке двигателестроения, т.к. в глобальном загрязнении атмосферы доля судовых двигателей не превышает 2-3 % и достигает 5 % только в районах интенсивного судоходства (Новиков, 2003).

5. Заключение

Проведённый анализ позволяет вплотную подойти к определению численных оценок, необходимых для формализации алгоритма оптимального выбора структуры СЭУ. Кроме того, логическое определение

перечня критериев, принимаемых во внимание при выборе СЭУ, необходимо для применения индивидуального подхода к выбору состава энергетической установки, характерного для современного судостроения.

Таблица. История развития критериев выбора типа СЭУ для заданной грузоподъемности и скорости судна

	конец XVIII в.	начало XX в.	2-я пол. XX в.	наст. время
Минимизация экипажа машинного отделения	*	*	*	*
Максимизация маневренности	*	*	*	*
Максимизация автономности	*	*	*	*
Максимизация мореходности	*	*	*	*
Минимизация стоимости производства		*	*	*
Максимизация надежности главного двигателя		*	*	*
Минимизация массогабаритных характеристик		*	*	*
Максимизация эффективности топливоиспользования (КПД)		*	*	*
Максимизация гибкости выработки и распределения мощности			*	*
Минимизации загрязнения воздушной и водной среды				*

Литература

- Fankhauser S.** World's first common-rail low-speed engine goes to sea. *Marine news*, N 3, p.12, 2001.
- Konrad H., Güttinger Beat.** First year of service successful for first Sulzer RT-flex. *Marine news*, N 1, p.4, 2003.
- Laurilehto M.** Gas fuelled engine for marine application Wärtsilä. *Marine news*, N 1, p.7, 2001.
- Башаев В.** Перспективные энергетические установки судов ледового плавания. *Морской флот*, № 1, с.65, 2004.
- Жемчугов Г.А., Калашников В.К., Круглин В.А.** Этапы создания и перспективы развития систем электродвижения судов. *Электричество*, № 4, 2000.
- Иванов А., Самсыгин В.** Состояние и перспективы развития судовых ГЭУ. *Морской флот*, № 2, 1999.
- Иванов М.Ю., Неелов А.Н., Сорокин В.А., Шишкин В.А.** Состояние и перспективы развития судовых малооборотных дизелей MAN B&W с электронными системами управления (ЭСУ). *Научно-техн. сборник Росс. морского регистра судоходства, СПб.*, № 27, с.241, 2004.
- Касаткин В.А., Романовский В.В.** Системы электродвижения для перспективных судов. *Судостроение*, № 4, с.35, 1999.
- Корытов Н.** Энергосбережение на морских судах. *Морской флот*, № 3, с.55, 2004.
- Костылев И.И., Смольник А.Ю.** Использование высокотемпературных органических теплоносителей на судах. *Научно-техн. сборник Росс. морского регистра судоходства, СПб.*, № 19, с.245, 1996.
- Новиков Л.А.** Контроль за выбросами вредных веществ и контроль дымности от судовых двигателей и судов в соответствии с постановлением РФ № 83 от 6 февраля 2002 г. *Научно-техн. сборник Росс. морского регистра судоходства, СПб.*, № 26, с.245, 2003.
- Новости, события, факты. Компания Нарэг – Lloyd заказала три суперконтейнеровоза. *Морской флот*, № 2, с.25, 2005.
- Расолов В.А., Романовский В.В.** Современные тенденции выбора типа энергетической установки. *Морской транспорт, серия "Техническая эксплуатация флота"*, вып. 22, с.1, 1992.
- Рибинраут А.М., Бурбаева Н.В.** Система электродвижения судов с гребным тихоходным двигателем двойного вращения. *Электричество*, № 6, с.7, 1999.