

Нелинейная физика в практике флота – рекуперация энергии при остановке Часть 3

DOI

Д-р техн. наук, профессор
Н.Д. Гайденок – Сибирский
федеральный университет,
г. Красноярск

@ ndgay@mail.ru

Ключевые слова:

неустойчивость, гребной винт, параль, турбина, упор, треугольники скоростей, нелинейные явления, перестройка, особенности преобразований, катастрофа складки, катастрофа сборки

Keywords:

purse, propeller, parale, turbine, thrust, velocity triangles, perestroika, transformation features, nonlinear phenomena, fold catastrophe, assembly catastrophe

NONLINEAR PHYSICS IN THE NAVY. PART 3

Doctor of Technical Sciences, Professor N.D. Gaidenok – Siberian Federal University, Krasnoyarsk

The paper considers four nonlinear phenomena studied in the framework of the theory of catastrophes, which are present in the practice of the fleet and relate to various aspects of logistics – depending on the speed of movement of the thrust force of the ship's propulsion and the magnitude of the Cx. Their correspondence to the catastrophes of folding and assembly is shown

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Изучение проблемы нелинейных физических явлений на флоте, обусловленное вопросами логистики, ряд из которых был уже исследован ранее [3; 4], наиболее оптимальным образом начать не с ее формализма, что впереди, а с анонса классической фразы известного физика Филиппа Ричарда Фейнмана: «Одинаковые уравнения – одинаковые решения», которую он раскрывает в монографии [12].

Не приводя всех аспектов объяснения, кратко ограничимся лишь следующим – широкий круг явлений природы описывается одними и теми же математическими конструкциями.

Несмотря на обширный список явлений природной неустойчивости, имеющих нелинейную природу, на флоте, включая, как

практику мореплавания, так и другие стороны флотской действительности, попадающих под формальный образ теории катастроф (ТК) и ее объекта исследований [11] – катастрофы сборки, которой описывается остойчивость корабля, в данной работе будут рассмотрены только два феномена:

1. Классическая зависимость коэффициента сопротивления воды движению судна;
2. Параль гребного винта (ГВ), показывающая наличия у него предела скорости.

В работе [4] получено аналитическое выражение для зависимости упора от скорости движения судна V_p или от относительной поступи λ_p , представляющей собой отношение V_p к окружной скорости ГВ $\pi D n$

[8], графический образ которого совпадает с классическим результатом [5] (рис. 1).

Это дает возможность для проведения строгого количественного анализа работы ГВ, что составляет цель данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве экспериментальной базы используется прогон моделей в бассейне. К числу методов относятся результаты исследований по судовым движителям, гидромеханике, теории катастроф.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перейдем к анализу особенностей зависимости величины C_x от скорости движения тела (рис. 2). Рисунок 2.б получен из рисунка 2.а путем поворота против часовой стрелки $\sim 40^\circ$. По оси ОХ указаны те же значения числа Рейнольдса. Здесь отчетливо видно соответствие рассматриваемой зависимости катастрофе сборки (рис. 8.б). Здесь обычно [1; 9] рассматривают только интервал $10^2 - 3 \times 10^5$, утверждая при этом «независимость C_x от Re » и принимая при этом $C_x = 1$ для поперечного обтекания цилиндра (свай) и $C_x = 0.4$ для шара, точнее горизонтально расположенной полусферы – крайне отдаленного подобия судна.

Последнее время в закризисной области $Re \geq 10^6$ для цилиндра, в качестве оценки C_x , при поперечном обтекании свай, рекомендуется величина 0.7. Этого может быть и достаточно для порядковых теоретических исследований, но совершенно не приемлемо для оптимизации перевозок, когда необходимо иметь более детальный вид формальной зависимости силы сопротивления F_{ex} от скорости.

Для этой цели воспользуемся формальным выражением C_x (1), которое аппроксимируется полиномом, начиная с 4-го порядка от Re - $P_4(Re)$

$$C_x = F_{ex} / [1/2 \rho S V^2] = P_4(Re) = aV^4 + bV^2 + cV + d \quad (1)$$

$$F_{ex} = \rho/2 [aV^4 + bV^2 + cV + d] [SV^2] = k(aV^6 + bV^4 + cV^3 + dV^2),$$

$$k = \rho S/2,$$

где V , L или S , v , ρ – скорость движения тела, «характерный размер» тела – длина или площадь поперечного сечения, вязкость и плотность среды.

Рассмотрим рисунок 2. Рисунок 2.б получен из рисунка 2.а, путем поворота против часовой стрелки $\sim 40^\circ$. По оси ОХ указаны те же значения числа Рейнольдса. Здесь отчетливо видно соответствие рассматриваемой зависимости катастрофе сборки (рис. 8.б).

Перейдем к анализу особенностей зависимости работы ГВ. Особенности его работы показаны в [8], где говорится, что, при взаимодействии ГВ с потоком окружающей его жидкости, набегающей или уходящей, существуют всего три состояния ГВ:

Крайние два, когда он работает как один из видов технического устройства – движитель, среда получает ускорение за счет приема энергии от ГВ (рис. 1) и турбины – ГВ получает энергию среды;

В работе рассмотрены три нелинейных явления, исследуемых в рамках теории катастроф, два из которых присутствуют в практике перевозок и относятся к техническим сторонам его логистики – зависимости от скорости движения силы тяги корабельного движителя и величины C_x . Показано их соответствие катастрофам складки и сборки.

Промежуточное состояние парали или, по терминологии Ф.А. Брикса [2], винт парализован, ибо он не может работать, ни как движитель, ни как турбина – «он толчет воду».

В более детализированном виде здесь наблюдается следующая картина динамики:

1. Пока λ_p меньше поступи нулевого упора, ГВ работает как движитель;

2. Когда λ_p больше поступи нулевого упора, но меньше поступи нулевого момента, – промежуточное состояние из п.2 верхнего списка;

3. Когда λ_p больше поступи нулевого момента, ГВ работает как турбина. Причем, здесь наблюдаются следующие контринтуитивные аспекты:

4. Вопреки ожиданиям, при росте скорости или λ_p , упор падает;

5. Дальнейшее увеличение λ_p приводит вообще к неопределенному состоянию;

6. Последующее за п.2. увеличение λ_p приводит уже к конкретным результатам.

Отмеченная бистабильность ГВ, в виде различных технических устройств, входит в широкий класс явлений и процессов, которые являются объектами изучения теории катастроф или теории особенностей дифференцируемых отображений, восходящей еще к А. Пуанкаре.

Теория катастроф в современном понимании имеет своей целью вовсе не прикладное построение экзотических геометрических образов и привязки их к тем или иным жизненным процессам, что, впрочем, имеет не только несомненный по-

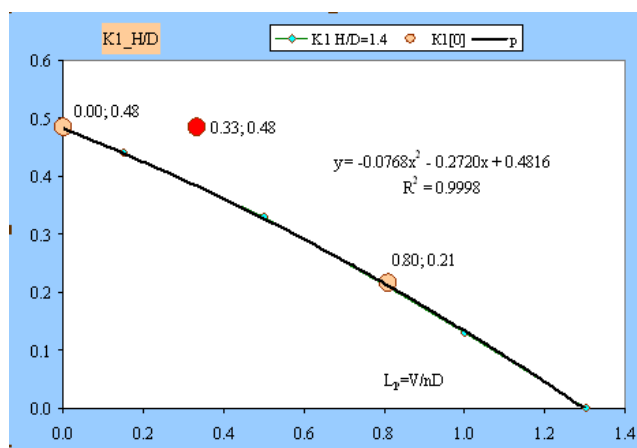


Рисунок 1. Соответствие показателей катера «Ярославец» из [7] классической зависимости упора от относительной поступи λ_p [4]

Figure 1. The correspondence of the indicators of the boat "Yaroslavets" from [7] the classical dependence of the stop on the relative gait of λ_p [4]

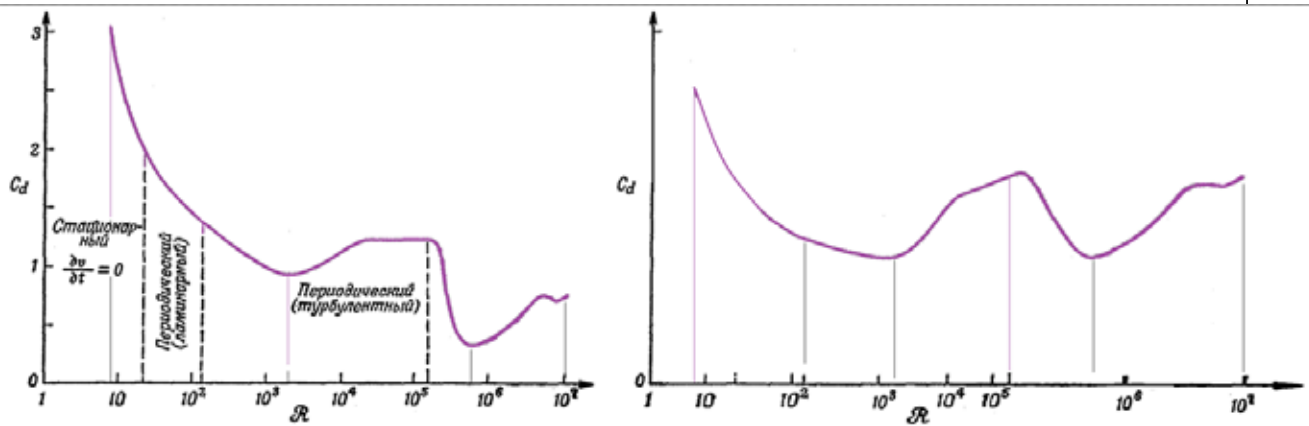


Рисунок 2. Зависимость коэффициента сопротивления воды движению тела от числа Рейнольдса [13]

Figure 2. Dependence of the coefficient of water resistance to body movement on the Reynolds number [13]



Рисунок 3. Интерпретация психологических феноменов в рамках теории катастроф [11]

Figure 3. Interpretation of psychological phenomena within the framework of catastrophe theory [11]

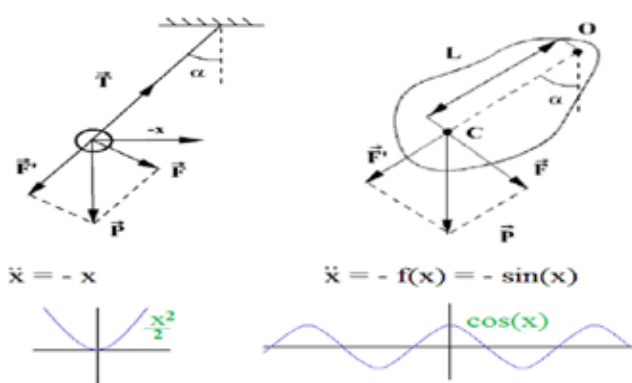


Рисунок 4. Иллюстрация физического и математического маятников

Figure 4. Illustration of physical and mathematical pendulums

знавательный аспект, но также и дает вектор направления исследований.

Например, для иллюстрации с помощью геометрического образа поверхности, перевернутой на 90°, катастрофы складки того факта, что для достижения высоких успехов одной увлеченности недостаточно, необходим и определенный талант (рис. 3).

Реальной целью теории катастроф является нечто совсем иное – детерминация и анализ необходимого и достаточного образа тех энергетических поверхностей – потенциалов, которые определяют динамику ряда исследуемых практических процессов, где движение может идти только так и не иначе.

Однако, если для ГВ имеется формальное выражение зависимости упора от относительной поступи λ_p [4], то для описания психологического перехода оно практически отсутствует, в силу значительно большей сложности объекта. Поэтому, сходство или различие рассмотренных объектов более подробно изучим на примере физического и математического маятников. Но, прежде всего, четко определим их свойства. Положение дел здесь заключается в том, что внешне один и тот же объект исследования называется двумя наименованиями – физическим или математическим маятником, т.е. более простой объект – шарик на нити или на тонком невесомом стержне без момента инерции изучался в курсе общей физики, а более сложный, представляющий объемное тело уже с достаточным моментом инерции – в более поздних курсах теоретической механики или вариационного исчисления (рис. 4).

Формально и феноменологически физический и математический маятники различаются лишь структурой потенциала (потенциальной энергии), определяющего особенности их динамики: для простого физического это функция $1/2x^2$; сложного математического – например, $\cos(x)$ (рис. 5).

Дальнейшие различия в динамике физического и математического маятников заключаются

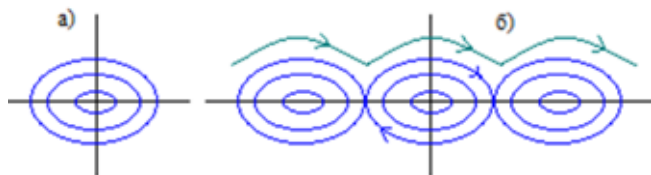


Рисунок 5. Фазовые портреты физического и математического маятников

Figure 5. Phase portraits of physical and mathematical pendulums

в том, что физический, при всех значениях потенциальной энергии, имеет лишь одно положение равновесия в точке $x = 0$, математический уже обладает значительно сложной картиной динамики (рис. 5). Кроме того, что здесь имеется несколько положений, расположенных через период, имеется еще одна траектория динамики – удаление в бесконечность, которое реализуется при очень высоких значениях энергии, вращаясь вокруг точки подвеса, как спутник вокруг своей планеты.

Изучив ряд необходимых формальных и феноменологических особенностей классических объектов динамики, перейдем к исследованию упора гребного винта. Как уже сказано выше, в работе [4] приводится формальное выражение и графические иллюстрации для упора гребного винта. Однако там главным аспектом исследования была степень аппроксимации реальным опытным данным. Ниже будет исследована общая картина зависимости упора гребного винта от скорости движения судна или относительной поступи λ_p , которая определяет угол атаки набегающего потока.

С этой целью вернемся к описанию особенностей работы ГВ, в зависимости от λ_p . На рисунке 6.а, заимствованном из [8], показан многоугольник скоростей и сил на плане лопасти винта, которая является практическим аналогом крыла самолета.

Кроме того, сравнение рисунка 6.б и рисунка 6.д, заимствованном из [10], показывает тот факт, что, как ГВ при низких величинах λ_p , так решетка из крыльев на стадии взлета имеют близкое направление углов атаки.

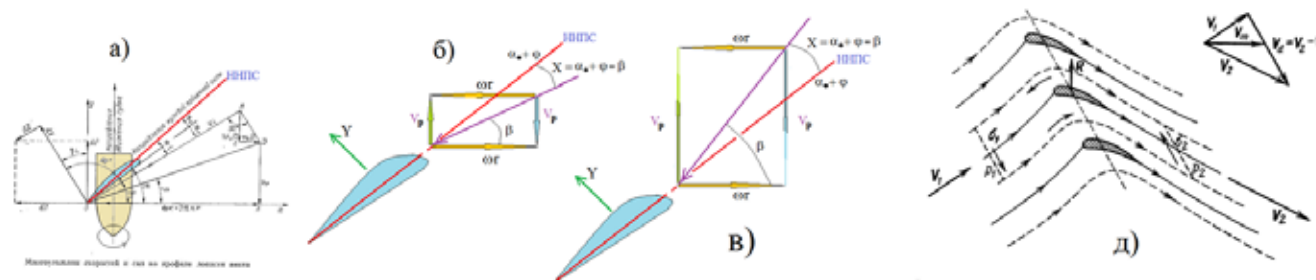


Рисунок 6. Многоугольник скоростей и сил на плане лопасти винта (а), иллюстрация угла атаки при различных скоростях движения V_p (б)

Figure 6. Polygon of velocities and forces on the plane of the propeller blade (a), illustration of the angle of attack at different speeds V_p (b)

Согласно уравнению Бернулли, отражающего закон сохранения полной энергии, упор или подъемная сила помноженная на $\cos(\beta)$ [8] создается в виде разности давлений на верхней и нижней сторонах лопасти, которая равна разности динамических напоров или кинетической энергии потоков омывающих лопасть (2):

$$P = 1/2\rho[V_u^2 - V_d^2], \quad (2)$$

где V_u , V_d – скорости потоков на верхней и нижней сторонах лопасти, соответственно.

Ввиду того, что расход среды также одинаков с обеих сторон лопасти, то скорости V^* , как с той, так и с другой стороны пропорциональны длинам соответствующих сторон. Тогда выражение (2) предстает с следующим виде (3)

$$P = 1/2\rho[L_u^2 - L_d^2], \quad (3)$$

где L_u , L_d – длины верхней и нижней сторон лопасти, соответственно, ρ – плотность воды.

В соответствии с (3) видно, что нулевой упор наблюдается при равенстве $L_u = L_d$, что показано в ряде случаев на рисунке 7, из которого видна четкая периодика нулевого упора, подобная тригонометрической окружности – в обоих случаях имеется 4 варианта.

Исходя из (3) и рисунка 7.д, где лопасть представлена в виде сегмента окружности с хордой R , и стороны L_u и L_d вычисляются в виде (4),

$$L_u = R(A - \sin(x)), L_d = R(1 + \sin(x)) \quad (4)$$

$$x = \alpha_0 + \varphi - \beta, \text{ (рис. 5)}$$

легко представить упор в виде (5), которое при условных величинах $A = 1.5$ и $R = 1$ показано красной кривой на рисунке 8.а.

$$2\rho P = (AR - R\sin(x))_2 - (R + R\sin(x))_2 = [R(A + 1)]^2 \sin(x) \quad (5)$$

Аналогичное выражение для зависимости подъемной силы от угла атаки, представимое также в виде $\sin(x)$, при $A = R = 1$ приводится в работе [10]. Здесь также видна эквивалентность содержимого рисунка 5.б и рисунка 8.а – аналогичная последовательность потенциальных ям.

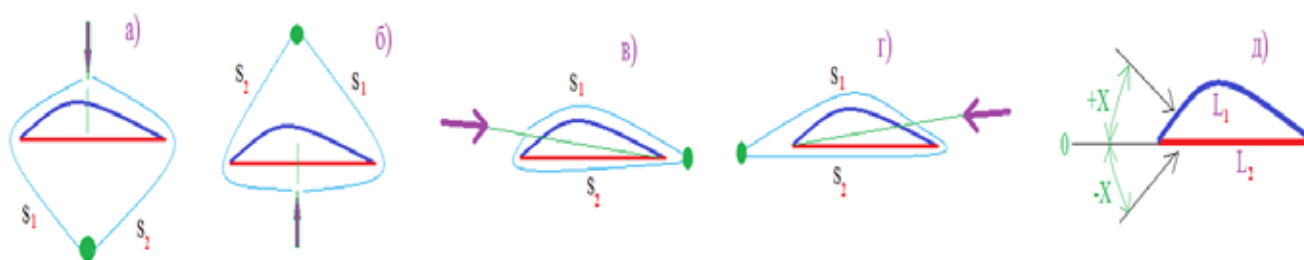


Рисунок 7. Случаи расположения осей нулевой подъемной силы гребного винта – а) + г) и схема циркуляции – д)

Figure 7. Cases of the arrangement of the axes of the zero lifting force of the propeller – а) + д) and the circulation scheme – е)

Имея графический образ упора, продолжим содержательный анализ. Вернемся к описанию вариантов работы ГВ. Здесь принципиальным является тот факт, что, в зависимости от величины λ_p , ГВ меняет характер взаимодействия с потоком – при малых он передает энергию, а при больших – принимает.

Для отражения этого факта используем основную аппарат теории катастроф – выделение главной части явления путем разложения его формального выражения (5) в ряд. Тогда получим (6) – полином 3-го порядка, что показано зеленой кривой на рисунке 8.а, представляющей собой первую элементарную катастрофу складки [11]. Здесь отчетливо видно, что на левом конце функция уходит вниз, а на правом – вверх, отражая разный характер взаимодействия ГВ с потоком.

$$2\rho P = (A^2 - 1)R^2 - 2(A + 1)R^2x + 1/3(A + 1)R^2x^3 \quad (6)$$

Получив представление о формальной природе упора ГВ, исследуем феноменологию тех устройств, которые он представляет при различных величинах относительной поступи λ_p . Для этого воспользуемся стандартным приемом аналитической механики [6], где сила представляется в виде производной по X от потенциальной энергии тела V , которую в этом случае можно

представить в виде интеграла по X от выражений (5) и (6).

Тогда получим для (5) и (6) выражения для потенциалов (7) и (8) – катастрофа сборки, соответственно, графические образы которых показаны на рисунке 8.б аналогичными цветами. Из данной иллюстрации видно, что минимум в левой части соответствует работе ГВ, как движителя, а в правой – как турбины. Промежуточный максимум в принулевой области – стадии «толчеи воды».

$$\rho V = (A^2 - 1)R^2x + 2(A + 1)R^2\cos(x) \quad (7)$$

$$2\rho V = (A^2 - 1)R^2x - (A + 1)R^2x^2 + 1/12(A + 1)R^2x^4 \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

Анализ вышеизложенного материала показывает феномен непропорциональности усилий и ожидаемого результата. Действительно, увеличение угла (4) показывает наличие предела скорости у ГВ, что обуславливает использование других типов двигателей.

Здесь стоит заметить факт – на практике работы ГВ наблюдается только стадия движителя, ибо переход относительной поступи λ_p через величину нулевого упора сначала маскируется инерцией и далее – реальным падением скорости движения судна.

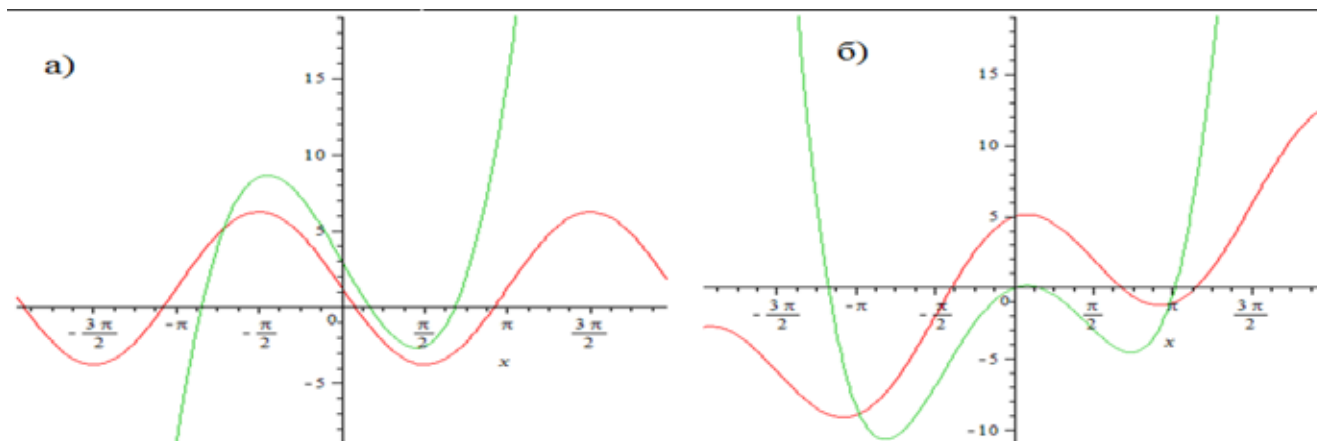


Рисунок 8. Иллюстрация упора (а) и потенциала ГВ

Figure 8. Illustration of the stop (а) and the GW potential



Наблюдение всех режимов возможно, как правило, либо при буксировке судна, либо на швартовых при работе нагнетателя.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Алферьев М.Я. Ходкость и управляемость судов. Сопротивление воды движению судов – М.: Транспорт, 1967 – 344 с
1. Alferyev M.Ya. Seaworthiness and controllability of vessels. Water resistance to the movement of ships – М.: Transport, 1967 – 344 p.
2. Брикс Ф.А. Паральная теория гребного винта – Петроград: Гос. изд-во, 1922. – 2-е изд., с изм. и доп. – 232 с
2. Briks F.A. The parallel theory of the propeller – Petrograd: State Publishing House, 1922. – 2nd ed., with amendments and additions – 232 p.
3. Гайденок Н.Д. Определение коэффициента сопротивления тралов гидравлично-математическим методом // Рыбное хозяйство. – 2021. – № 2. – С 70-76. DOI 10.37663/0131-6184-2021-2-90-98
3. Gaidenok N.D. Determination of the drag coefficient of trawls by the hydraulic-mathematical method // Fisheries. – 2021. – No. 2. – Pp. 70-76. DOI 10.37663/0131-6184-2021-2-90-98.
4. Гайденок Н.Д. Об использовании геометрии и механических особенностей в алгоритме расчета упора гребных винтов корабельных движителей // Рыбное хозяйство. – 2021. – № 4. – С 70-76.
4. Gaidenok N.D. On the use of geometry and mechanical features in the algorithm for calculating the thrust of propellers of ship propellers // Fisheries. – 2021. – No. 4. – Pp. 70-76.
5. Дорогостайский Д.В. Теория и устройство судна / Д.В. Дорогостайский, М.М. Жученко, Н.Я. Мальцев – Л.: Судостроение, 1976. – 416 с.
5. Dorogostaysky D.V. Theory and structure of the vessel / D.V. Dorogostaysky, M.M. Zhuchenko, N.Ya. Maltsev – L.: Shipbuilding, 1976. – 416 p.
6. Заславский Г.М. введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса / Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев – М.: Наука, 1988. – 308 с.
6. Zaslavsky G.M. introduction to nonlinear physics: from the pendulum to turbulence and chaos / G.M. Zaslavsky, R.Z. Sagdeev – М.: Nauka, 1988. – 308 p.
7. Катер «Ярославец» <http://russrivership.ru/public/files/doc1130.pdf>
7. Boat "Yaroslavets" <http://russrivership.ru/public/files/doc1130.pdf>
8. Лаврентьев В.М. Судовые движители. – Ленинград–Москва: Морской транспорт, 1949. – 276 с.
8. Lavrentiev V.M. Ship movers. – Leningrad-Moscow: Sea Transport, 1949. – 276 p.
9. Ландау Л.Д. Теоретическая физика, Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 2001, т. 6 – 540 с.
9. Landau L.D. Theoretical physics, Hydrodynamics / L.D. Landau, E.M. Lifshits – М.: Nauka, 2001, vol. 6 – 540 p.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа – М.: Наука, 1975. – 548 с.
10. Loitsiyan L.G. Mechanics of liquid and gas – М.: Nauka, 1975. – 548 p.
11. Постон Г. Теория катастроф и ее приложения // пер. с англ. / Г. Постон, И. Стюарт – М.: Мир, 1980 – 608 с.
11. Poston G. The theory of catastrophes and its applications // translated from English / G. Poston, I. Stewart – М.: Mir, 1980 – 608 p.
12. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс / пер. с англ. – М.: Мир, 1980, т.5. – 608 с.
12. Feynman R. Feynman lectures on physics. Electricity and magnetism / R. Feynman, R. Leighton, M. Sands / translated from English – М.: Mir, 1980, vol. 5. – 608 p.
13. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Физика сплошных сред / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс / пер. с англ. – М.: Мир, 1980, т.7. – 300 с.
13. Feynman R. Feynman lectures on physics. Physics of continuous media / R. Feynman, R. Leighton, M. Sands / trans. from English – М.: Mir, 1980, vol. 7. – 300 p.