

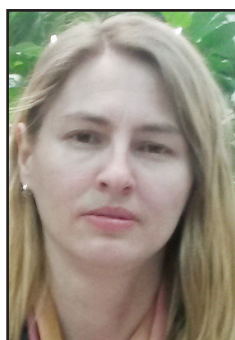


Вихревые движители водных и воздушных судов



Николай ОСТРОУХОВ
Nikolai N. OSTROUKHOV

Екатерина ЧУМАКОВА
Ekaterina V. CHUMAKOVA



Остроухов Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Прикладная математика, информационные технологии и электротехника» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.
Чумакова Екатерина Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика, информационные технологии и электротехника» МАИ, Москва, Россия.

Vortex Propulsion Units of Sea Vessels and Aircrafts (текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 92)

Предложены принципиальные схемы и выполнены оценки основных параметров водных и воздушных судов с движителями в виде генераторов вихревых пар, в том числе тороидальных вихрей (термиков).

Показано, что эффективность таких движителей увеличивается с увеличением их габаритов, так что в случае надводных судов движители обеспечивают плавучесть транспортного средства, возможность размещать полезный объем в надводной части, а в случае воздушных и подводных судов – внутри движителя. Поскольку вихревая пара перемещается в окружающей среде, не испытывая лобового сопротивления, выполненные по предложенным схемам суда тоже не имеют лобового сопротивления. Этот фактор дает конструкции немалые преимущества по затратам мощности на перемещение по воде и воздуху.

Ключевые слова: воздушные суда, водные суда, вихревая пара, лобовое сопротивление, диссипация энергии вихря, особенности конструкции.

Практически все современные водные и воздушные транспортные средства (суда) выполнены по раздельной схеме «двигатель – корпус судна», при которой движитель в результате взаимодействия с окружающей средой создает необходимое тяговое усилие. При такой компоновке для перемещения судна требуется преодолеть силу сопротивления среды, обусловленную встречным скоростным напором, действующую на корпус, а чаще и на корпус, и на движитель.

С ростом габаритов транспортных средств и скоростей их перемещения указанные силы сопротивления увеличиваются, и пропорционально их произведению возрастает мощность, потребная для движения, которая в этом случае оказывается пропорциональной произведению куба скорости на площадь поперечного сечения судна.

Возможный вариант не преодоления, а «обхода» проблемы сопротивления воды или воздуха (случаи судна и дирижабля соответственно) – использование специфического течения, известного в гидродинамике как вихревая пара [1–3]. Частная форма парности – тороидальный вихрь или термик.

Вихревая пара – это два сравнительно близко расположенных вихря с взаимно противоположными направлениями вращения [4, 5]. Расположение можно считать близким, если каждый из вихрей сравнительно эффективно взаимодействует с течением, создаваемым другим. В таком течении существует некая ограниченная область (объем) с замкнутыми траекториями движения жидкости, которая перемещается в окружающей среде, причем скачок скорости жидкости на границе движущейся области отсутствует, то есть указанная область перемещается в окружающей среде без лобового сопротивления.

Размещенный в области замкнутого течения корпус судна, объединенный с генератором вихря, также перемещается в среде, не испытывая лобового сопротивления. Конструктивная схема такого гипотетического судна, как водного, так и воздушного, кардинально отличается от всех, используемых до настоящего времени.

Целью нашего исследования стал анализ возможных схем компоновки судов «корпус – генератор вихревой пары, являющейся двигателем» с оценкой основных параметров таких транспортных средств и сопоставление их с традиционными схемами.

1. ГИДРОМЕХАНИКА ВИХРЕВОЙ ПАРЫ

Два вихря с противоположными по знаку, но равными по модулю циркуляциями (рис. 1а) движутся поступательно вдоль прямой, перпендикулярной отрезку, соединяющему центры вихрей, со скоростью [5, 6]:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi r}; \quad (1)$$

$$\Gamma = 2\pi a v_0 = 2\pi \omega a^2, \quad (2)$$

где Γ – циркуляция вихрей, r – расстояние от линии симметрии до центра вихря.

На рис. 1б показана схема линий тока вихревой пары в системе отсчета, движущейся вместе с вихревыми нитями. Часть жидкости, отмеченная штрихами, остается постоянно в окрестности вихревых нитей.

Подобная пара вихрей является плоским элементом вихревого кольца, которое может быть еще одним вариантом органи-

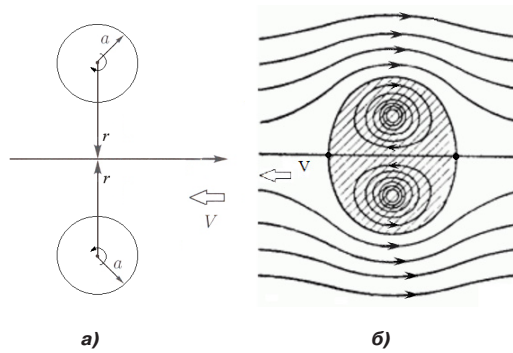


Рис. 1. Схема генераторов вихревой пары (а) и линий тока в ее окрестности (б).

зации вихревого двигателя. Например, возможно транспортное средство в виде тора, внешняя оболочка которого будет генерировать тороидальный вихрь (рис. 2) и выступать в роли двигателя.

Оценка скорости поступательного движения вихревого кольца получается из формулы Кельвина [7, 8]:

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi r} \left[\ln \frac{8r}{a} - \frac{1}{4} \right]. \quad (3)$$

При достаточной глубине водоема пара прямолинейных вихрей замыкается в подводной части, образуя половину тороидального вихря (рис. 3).

Если в качестве генератора искусственного вихря использовать вращающийся цилиндр, то максимальная линейная скорость на боковой поверхности цилиндра не должна превышать значения, при котором скоростной напор жидкости равен полному давлению в жидкости [8],

т.е. $v_{\max} = \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}$, где p_0 – давление в жид-

кости. При большей скорости возникает кавитация жидкости и ее разгон вращением ротора невозможен. В случае надводного судна $p_0 = 1 \text{ атм} \cong 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$

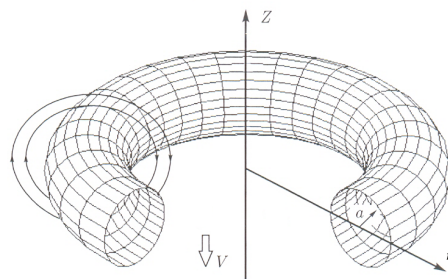


Рис. 2. Тороидальный вихрь.



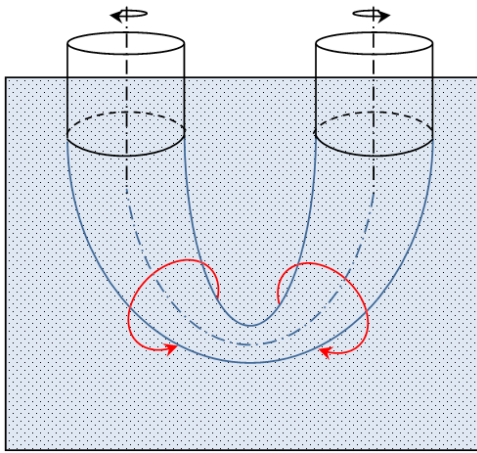


Рис. 3. Смыкание двух приповерхностных линейных вихрей с образованием полутороидального вихря.

и максимально допустимая линейная скорость на поверхности роторов $v_{max} \cong 15$ м/с; при $p_0 = 10$ атм, $v_{max} \cong 45$ м/с.

Поскольку, с одной стороны, при прочих равных условиях скорость судна тем

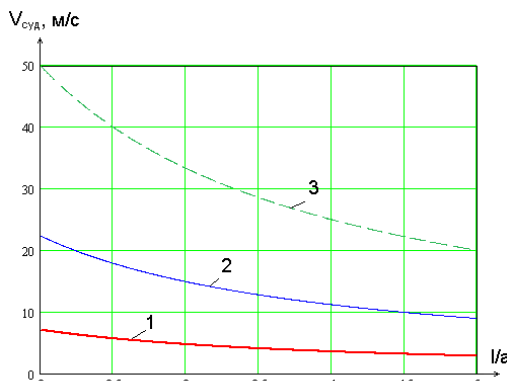


Рис. 4. Зависимость скорости поступательного движения от отношения l/a (отношения межроторного расстояния к радиусу ротора) – $p_0 = 1$ атм (1); 10 атм (2); 50 атм (3).

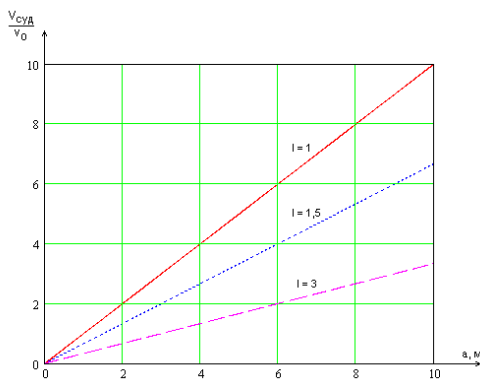


Рис. 5. Зависимость безразмерной скорости движения судна от радиуса ротора для различных значений межроторного расстояния.

больше, чем меньше межосевое расстояние $l = 2r$, а с другой, это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы в окрестности каждого ротора сформировалось замкнутое течение, вопрос об оптимизации l приобретает самостоятельное значение. Исходным условием для оптимизации может быть распределение скорости жидкости в окрестности вращающегося цилиндра – генератора вихря. В отсутствие диссипативных потерь циркуляция жидкости постоянна $\Gamma_0 = const$ и имеет место зависимость отношения скорости поступательного движения к линейной скорости вихря от расстояния между центрами вихрей, которая приведена на рис. 4.

На рис. 5 представлено семейство кривых $\frac{V_{суд}}{v_0}(a)$ для нескольких l – значений межроторного расстояния.

В вязкой жидкости для поддержания такого движения необходимо сообщение энергии извне от источника завихренности, например, от вращающегося в жидкости цилиндра. Сила, потребляемая на преодоление сил внутреннего трения $F_{тр}$:

$$F_{mp} = S\eta \frac{dv}{dr} = -\frac{h\eta a\Gamma}{2r^2}, \quad (4)$$

где S – площадь цилиндра, η – динамическая вязкость жидкости; а мощность при этом:

$$P = F_{mp} v(r) = -\frac{h\eta a\Gamma^2}{4\pi r^3}. \quad (5)$$

На рис. 6 приведена зависимость потребляемой мощности на поддержание

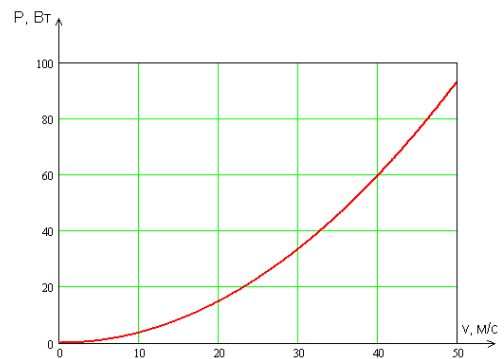


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности от скорости движения, необходимой для поддержания вихрей.



Рис. 7. Зависимость потребляемой мощности от скорости движения для судна каплевидной формы с традиционным двигателем (винтом) водоизмещением 4000 т.

вихревого движения от скорости движения судна водоизмещением $\cong 4000$ т.

Для судов с традиционными двигателями зависимость от скорости мощности, потребляемой на преодоление лобового сопротивления для тела каплевидной формы водоизмещением $\cong 4000$ т, в подводном положении:

$$P(v) = F_{mp} v = C_x S \frac{\rho v^3}{2}, \quad C_x = 0,045. \quad (6)$$

На рис. 7 приведен график этой зависимости.

Как видно из графиков, потребляемая мощность судов с двигателями предложенного вида в 10^7 раз меньше, чем у судов с традиционными двигателями.

Однако для раскрутки вихрей необходимо затрачивать значительное количество энергии, превышающее цифры для традиционных двигателей. Энергия, затрачиваемая на раскрутку вихрей, имеет зависимость

$$E = \frac{\Gamma^2 \rho h}{16\pi} \ln(10) \quad (7)$$

и приведена на рис. 8.

При запуске привода генераторов вихрей они в начальный момент окружены неподвижной средой. Этой стадии соответствуют максимальные градиенты скоростей. Их оценку сверху можно сделать, предположив, что в начальный момент перепад скорости от линейной скорости движения на поверхности до нуля реализуется на толщине пограничного слоя среды (жидкости).

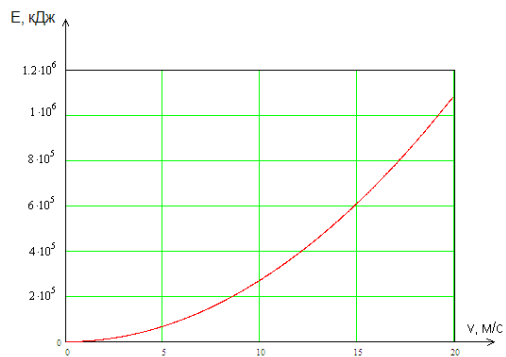


Рис. 8. Зависимость энергии, затрачиваемой на раскрутку вихрей, от скорости движения вихревой пары.

Толщина пограничного δ оценивается из соотношения:

$$\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}}, \quad (8)$$

где L – длина разгонного участка, Re – число Рейнольдса.

Мощность, затрачиваемую на стадии раскрутки роторов, можно найти с помощью соотношения

$$N^* = S_{вих} \mu (gradV)_{max} v_{max}, \quad (9)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, а максимальный градиент скорости определяется следующим образом:

$$(gradV)_{max} = \frac{v_{max}}{\delta}. \quad (10)$$

На основе проведенных вычислений мощностей можно оценить время, необходимое для раскрутки роторов:

$$t = \frac{E}{N^*} = \frac{\rho a \delta}{8\mu} \ln(d), \quad (11)$$

где d – отношения межроторного расстояния к радиусу ротора, ρ – плотность среды (воды), μ – динамическая вязкость среды.

На рис. 9 показана зависимость времени формирования движения от радиуса ротора для различных значений межроторного расстояния.

2. СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРОВ И ВАРИАНТЫ КОМПОНОВКИ

Наилучшими характеристиками в качестве двигателя обладает тороидальный вихрь (рис. 2), имеющий минимальные диссипативные потери и максимальное



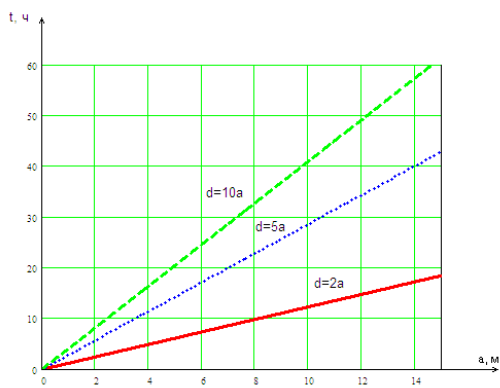


Рис. 9. Зависимость времени формирования движения от радиуса ротора.

время жизни в отсутствие иницирующего источника вращения. Однако возникать и существовать тороидальный вихрь может лишь в однородной среде, применительно к условиям нашей темы – в атмосфере или водном слое толщиной, по крайней мере, на порядок большей размера тора. На границе раздела, например на поверхности воды, тороидальный вихрь принципиально невозможен. Простейшим генератором тороидального вихря является вращающаяся тороидальная оболочка. В этом случае корпус судна размещается (встраивается) внутри такой оболочки. Конструктивно-технологическая реализация подобных воздушных (дирижаблей) и водных (в этом случае всегда подводных) судов вследствие оригинальности большинства конструктивных элементов, очевидно, связана с рядом технических (инженерных) проблем.

Простейшим генератором поверхностной вихревой пары служат два вертикальных вращающихся (во взаимно противоположных направлениях) цилиндра, реализующих в конечном счете полутороид-

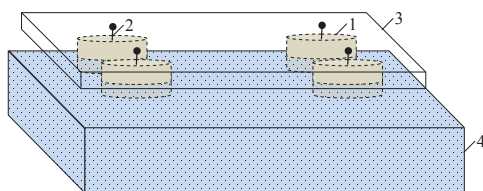


Рис. 10. Схема реализации судна на двух вихревых парах, получаемых вертикально вращающимися цилиндрами: 1 – ротор, 2 – опора, 3 – платформа, 4 – среда (вода).

дальный вихрь (рис. 3). Однако на такой отдельной паре цилиндров нельзя смонтировать корпус надводного судна без дополнительных опор в воде. Две и большее число пар цилиндров позволяют монтировать в надводной части (с опорой на оси цилиндров) платформу в качестве несущего элемента надводного судна [10]. Существенно отсутствие явных ограничений на форму и грузоподъемность (водоизмещение) платформы. С увеличением диаметров цилиндров увеличивается водоизмещение и остойчивость судна и реализуется большая эффективность движения вихревой пары.

Генераторами вихрей могут быть, например, цилиндры, расположенные в виде двух параллельных рядов, на которые помещается несущая платформа (корпус). Подобная конструкция предполагает формирование двух вихревых цепочек, причем генераторы вихрей (цилиндры) можно расположить двумя способами: каждый генератор вихря одного ряда помещается напротив цилиндра другого ряда (рис. 11) или помещается напротив середины интервала между двумя соседними цилиндрами другого ряда (рис. 12).

Каждая из приведенных систем также будет двигаться поступательно со скоростями:

для симметричного расположения

$$V = \frac{\Gamma}{2b} cth \frac{\pi 2r}{b}, \tag{12}$$

для смещенного расположения

$$V = \frac{\Gamma}{2b} th \frac{\pi 2r}{b}, \tag{13}$$

где b – расстояние между соседними генераторами вихрей.

Устойчивость систем этих различных расположений вихрей относительно друг друга были исследованы Карманом. Было доказано, что симметричное расположение является неустойчивым, то есть с течением времени вихри смещаются от положений, отвечающих невозмущенному состоянию. Смещенное расположение является устойчивым, а следовательно, не требует дополнительных энергетических затрат на преодоление сил, смещающих вихри. Условие устойчивости, полученное Карманом, имеет вид [11]:

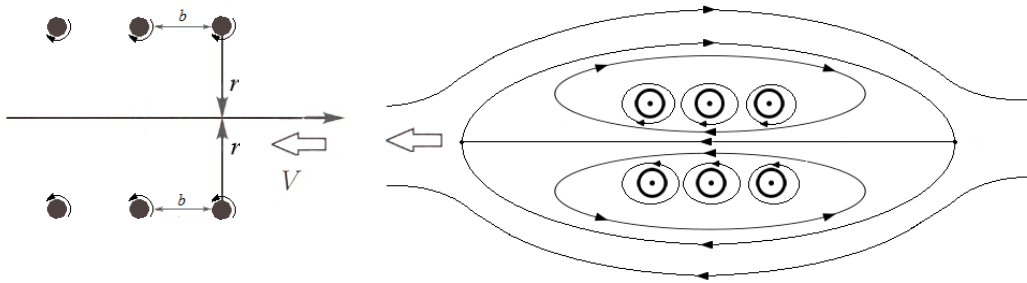


Рис. 11. Симметричное расположение генераторов вихрей и схемы линий тока.

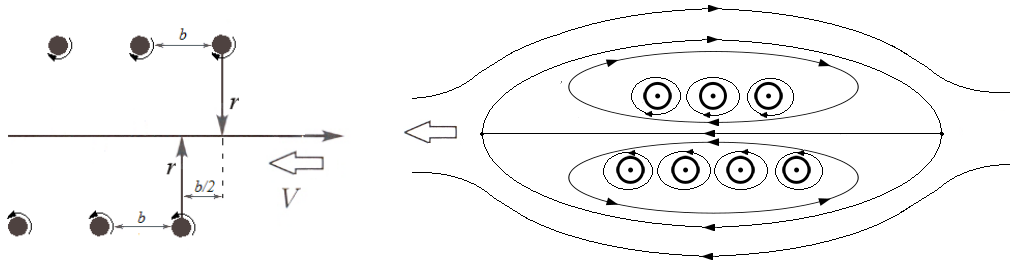


Рис. 12. Смещенное расположение генераторов вихрей и схемы линий тока.

$$\frac{2r}{b} = 0,2806. \quad (14)$$

При числе пар цилиндров больших двух оптимизация их количества и взаимного расположения становится отдельной самостоятельной задачей.

ВЫВОДЫ

1. Проведен целевой обзорный анализ течений, генерируемых вихревой парой. Из факта непрерывности распределения скорости среды в окрестности пары выделено следствие о том, что область замкнутого движения перемещается в окружающей среде без лобового сопротивления.

2. Предложены принципиальные схемы компоновки воздушных и подводных судов с размещением корпусов судов внутри генераторов вихревых пар. Для надводных судов предложена схема расположения корпуса судна вне воды с опорой на оси погруженных в воду цилиндров — генераторов вихревых пар. Суда, выполняемые по предложенным схемам, при перемещении не испытывают лобового сопротивления.

3. Показано, что мощность, необходимая для перемещения судов, выполненных по

предложенным схемам, на несколько (5–7) порядков меньше мощности, потребляемой традиционными судами.

4. Выполнены оценки энергии, потребной для формирования установившегося движения в области замкнутого течения в окрестности вихревой пары и времени его формирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симанович А. И. Конструкция корпуса промышленных судов. — М.: Мир, 2005. — 584 с.
2. То ли мачта, то ли парус // Популярная механика. — 2011. — № 101. — С. 80–84.
3. Ильин А. Парусники без парусов // Юный техник. — 2007. — № 5. — С. 65–69.
4. Козлов В. В. Общая теория вихрей. — Ижевск: Удмурт. ун-т, 1998. — 238 с.
5. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — Том 2. — М.: Наука, 1970. — 568 с.
6. Ламб Г. Гидродинамика: Пер. с англ. — М.: ОГИЗ, 1947. — 929 с.
7. Sir Thomson W. (Lord Kelvin). The translatory velocity of circular vortex ring // Phil. Mag. (4). — 1867. — Vol. 33. — P. 511–512.
8. Гельмгольц Г. Основы вихревой теории. — Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2002. — 82 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 744 с.
10. Недоруб С. А., Остроухов Н. Н. Движитель транспортного средства. Патент № 1533948, СССР. Заяв. № 4286395/27–11 от 17.07.1987. Публ. 07.01.1990. Бюл. № 1.
11. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — Часть 1. — М., 1963. — 584 с.

Координаты авторов: **Остроухов Н. Н.** — vtvnukde@mail.ru, **Чумакова Е. В.** — ekat.v.ch@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 14.11.2016, принята к публикации 28.12.2016.



VORTEX PROPULSION UNITS OF SEA VESSELS AND AIRCRAFTS

Ostroukhov, Nikolai N., Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia.
Chumakova, Ekaterina V., Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia.

ABSTRACT

Basic diagrams and estimates of the main parameters of sea vessels and aircrafts with propulsion units in the form of generators of vortex pairs, including toroidal vortices (thermals) are proposed. It is shown that the efficiency of such propulsion units increases with the increase in their dimensions, so that in case of surface vessels propulsion units provide the buoyancy of the vehicle,

the ability to locate a useful volume in the above-water part, and in case of air and submarine vessels – inside the propulsion unit. Since the vortex pair moves in the environment, without experiencing frontal resistance, vessels, manufactured according to the proposed schemes, also do not have frontal resistance. This factor gives the design a considerable advantage in the cost of power to move through water and air.

Keywords: aircraft, sea vessels, vortex pair, drag, dissipation of vortex energy, structural features.

Background. Almost all modern water and air vehicles (vessels) are made in a separate scheme «propulsion unit – vessel's hull», in which the propulsive device, as a result of interaction with the surrounding environment, creates a necessary traction effort. With such an arrangement, to move the vessel, it is required to overcome the force of the medium's resistance, caused by a counter-impact pressure, acting on the body, and more often on the body and on the propulsion unit.

With the increase in the dimensions of vehicles and the speeds of their movement, these resistance forces increase, and the power required for movement increases in proportion to their product, which in this case is proportional to the product of the velocity cube over the cross-sectional area of the vessel.

A possible option is not to overcome, but «bypass» the problem of water or air resistance (the cases of a ship and airship, respectively) is the use of a specific flow known in hydrodynamics as a vortex pair [1–3] and its particular case is a toroidal vortex or thermal.

A vortex pair is two relatively closely spaced vortices with mutually opposite directions of rotation [4, 5]. The arrangement can be considered close if each of the vortices comparatively efficiently interacts with the current created by the other. In such a flow there is such a limited region (volume) with closed trajectories of fluid motion, which moves in the environment, and there is no jump in the velocity of the fluid at the boundary of the moving region, that is, this region moves in the environment without frontal resistance.

Located in the closed flow area, the vessel's hull, combined with the vortex generator, also moves in the medium, without experiencing frontal resistance. The constructive scheme of such a hypothetical

vessel, both water and air, is radically different from all used up to the present time.

The purpose of this work is to analyze the possible layout schemes for vessels «hull – generator of a vortex pair that is a propulsor» with an assessment of the main parameters of such vehicles and their comparison with traditional schemes.

Objective. The objective of the authors is to consider vortex propulsion units of sea vessels and aircrafts.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, mathematical calculations, evaluation approach, comparative analysis.

Results.

1. Vortex pair hydromechanics

Two vortices with opposite in sign but equal in modulus circulation (Pic. 1a) move translationally along a straight line perpendicular to the segment joining the centers of the vortices with the velocity [5, 6]:

$$V = \frac{G}{4\pi r}; \tag{1}$$

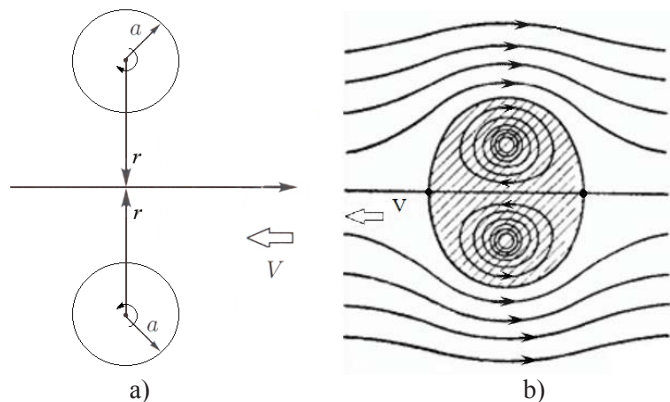
$$G = 2\pi a v_0 = 2\pi \omega a^2, \tag{2}$$

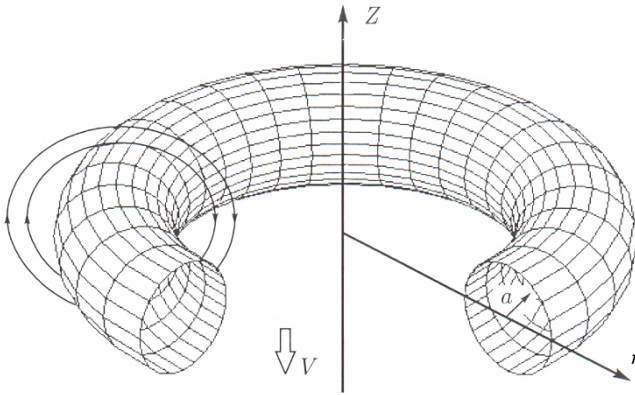
where G is circulation of the vortices, r is the distance from the line of symmetry to the center of the vortex.

Pic. 1b shows a diagram of the current lines of a vortex pair in a reference frame moving with vortex filaments. Part of the fluid, marked with dashes, remains constantly in the vicinity of the vortex filaments.

Such a pair of vortices is a plane element of a vortex ring, which can be another version of the organization of the vortex propulsor. For example, a vehicle in the form of a torus is possible, the outer

Pic. 1. Diagram of generators of a vortex pair (a) and streamlines in its vicinity (b).





Pic. 2. The toroidal vortex.

shell of which will generate a toroidal vortex (Pic. 2) and act as a propulsor.

An estimate of the translational velocity of a vortex ring is obtained from the Kelvin formula [7, 8]:

$$V = \frac{G}{4\pi r} \left[\ln \frac{8r}{a} - \frac{1}{4} \right]. \quad (3)$$

At a sufficient depth of the reservoir, a pair of rectilinear vortices closes in the underwater part, forming a half of the toroidal vortex (Pic. 3).

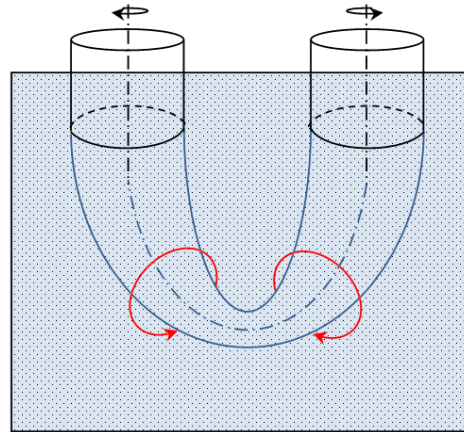
If a rotary cylinder is used as an artificial vortex generator, the maximum linear velocity on the lateral surface of the cylinder should not exceed the value at which the velocity head of the liquid is equal to the

total pressure in the liquid [8], i.e. $v_{\max} = \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}$, where

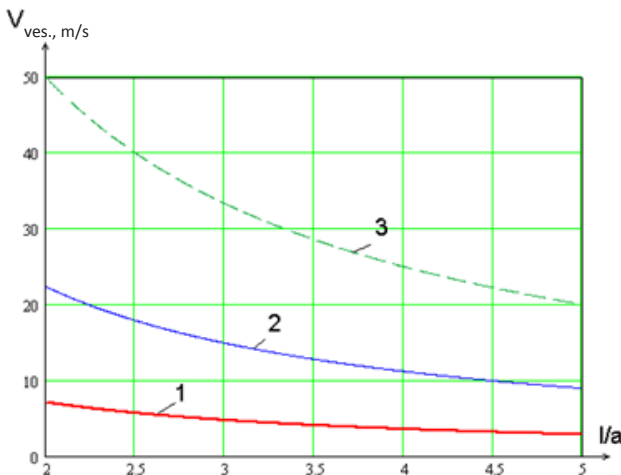
p_0 is the pressure in the liquid. At higher speed cavitation of the liquid occurs and its acceleration by rotation of the rotor is impossible. In the case of a surface vessel $p_0 = 1 \text{ atm} \cong 10^5 \text{ N/m}^2$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ and the maximum permissible linear velocity on the surface of the rotors is $v_{\max} \cong 15 \text{ m/s}$; at $p_0 = 10 \text{ atm}$, $v_{\max} \cong 45 \text{ m/s}$;

Since, on the one hand, with other things being equal, the speed of the vessel increases, the smaller is the interaxial distance $l = 2r$, and on the other, this distance must be large enough that a closed flow forms in the vicinity of each rotor, the optimization question l acquires an independent value. The initial

condition for optimization can be the distribution of fluid velocity in the vicinity of a rotating cylinder – a vortex generator. In the absence of dissipative losses, the circulation of the liquid is constant $G_0 = \text{const}$, and the ratio of the velocity of translational motion to the linear velocity of the vortex depends on the distance between the centers of the vortices, which is shown in Pic. 4.

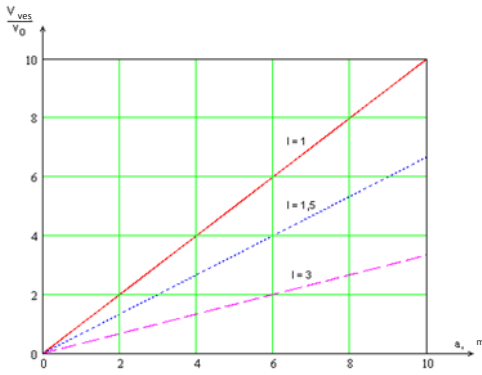


Pic. 3. Closure of two near-surface linear vortices with the formation of a half-toroidal vortex.

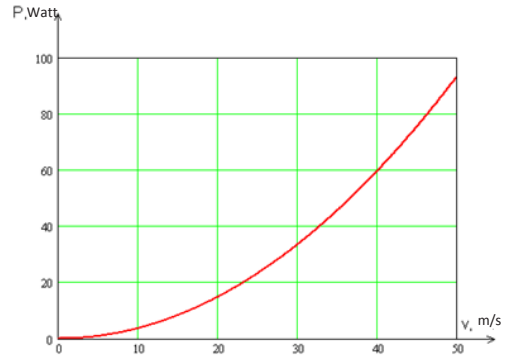


Pic. 4. Dependence of the speed of translational motion on the ratio l/a (ratio of the rotor-to-rotor distance) – $p_0 = 1 \text{ atm}$ (1); 10 atm (2); 50 atm (3).

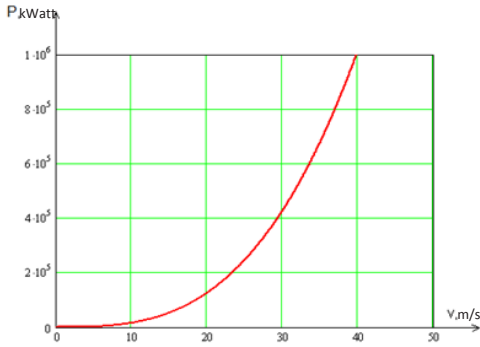




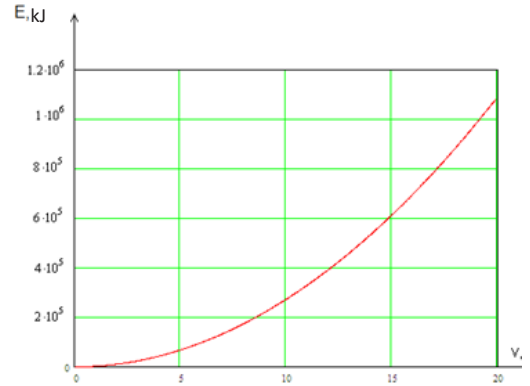
Pic. 5. Dependence of the dimensionless speed of the vessel from the radius of the rotor for different values of the inter-rotor distance.



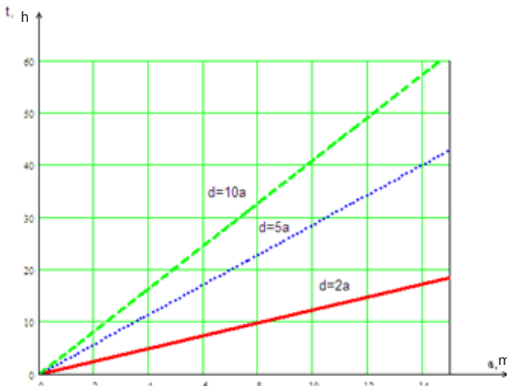
Pic. 6. Dependence of power consumption on the speed required to maintain vortices.



Pic. 7. Dependence of the power consumption on the speed of movement.



Pic. 8. Dependence of the energy consumed for rotation of vortices on the velocity of the vortex pair.



Pic. 9. Dependence of the time of formation of motion on the radius of the rotor.

Pic. 5 shows a family of curves $\frac{V_{wes}}{v_0}(a)$ for several

l – values of the inter-rotor distance.

In a viscous fluid, to maintain such motion, it is necessary to impose energy from outside the source of vorticity, for example, from a cylinder rotating in a liquid. The force required to overcome the forces of internal friction F_{fr} :

$$F_{fr} = S\eta \frac{dv}{dr} = -\frac{h\eta aG}{2r^2}, \quad (4)$$

where S is the area of the cylinder, η is the dynamic viscosity of the fluid; and the power is:

$$P = F_{fr}v(r) = -\frac{h\eta aG^2}{4\pi r^3}. \quad (5)$$

Pic. 6 shows the dependence of the power consumption on maintaining the vortex motion on the speed of the vessel with displacement of 4000 tons.

For vessels with traditional propulsors, the dependence of the speed of power consumed to overcome the drag for a drop-shaped body with displacement of $\cong 4000$ tons, in the underwater position, is determined in accordance with:

$$P(v) = F_{fr}v = C_x S \frac{\rho v^3}{2}, \quad C_x = 0,045. \quad (6)$$

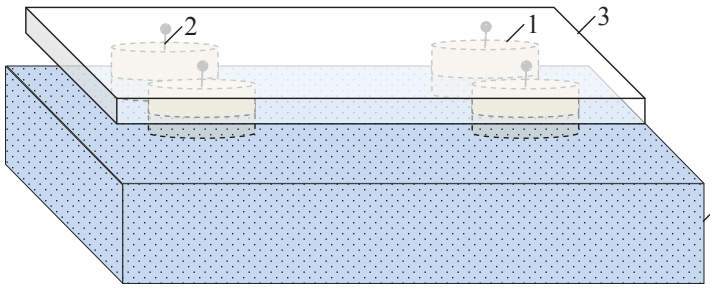
Pic. 7 is a graph of this dependence.

As can be seen from the graphs, the power consumption of vessels with propellers of the proposed type is 10^7 times less than for vessels with traditional propulsors.

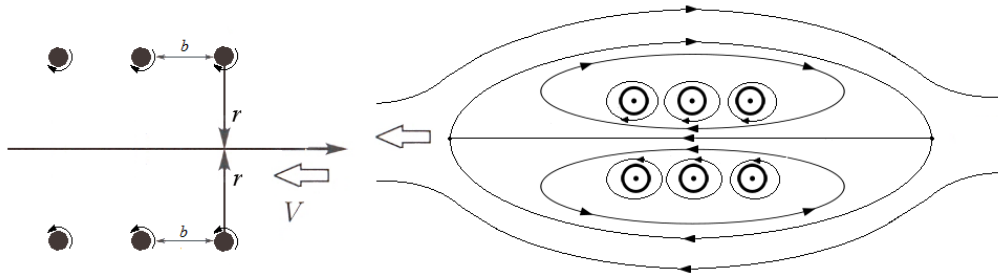
However, for rotation of vortices it is necessary to expend a considerable amount of energy, exceeding the figures for traditional engines. The energy consumed for rotation of vortices has a dependence

$$E = \frac{G^2 \rho h}{16\pi} \ln(10) \quad (7)$$

and is shown in Pic. 8.



Pic. 10. Scheme of ship realization on two vortex pairs obtained by vertically rotating cylinders: 1 – rotor, 2 – support, 3 – platform, 4 – medium (water).



Pic. 11. Symmetrical arrangement of the vortex generators and current flow diagrams.

When starting the drive of the vortex generators, they are initially surrounded by a stationary medium. This stage corresponds to the maximum velocity gradients. They can be estimated from above by assuming that at the initial moment the velocity drop from the linear velocity of motion on the surface to zero is realized on the thickness of the boundary layer of the medium (liquid).

The thickness of the boundary layer δ is estimated from the relation:

$$\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}} \quad (8)$$

where L is the length of an accelerating section, Re is the Reynolds number.

The power consumed at the stage of rotation of the rotors can be found with the aid of the relation

$$N^* = S_{\text{vor}} \mu (\text{grad} V)_{\text{max}} v_{\text{max}} \quad (9)$$

where μ is dynamic viscosity of the fluid, and the maximum velocity gradient is defined as follows:

$$(\text{grad} V)_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}}{\delta} \quad (10)$$

Based on the performed calculations of the capacities, it is possible to estimate the time required for rotation of the rotors:

$$t = \frac{E}{N^*} = \frac{\rho a \delta}{8\mu} \ln(d), \quad (11)$$

where d is the ratio of the rotor-to-rotor distance to the rotor radius, ρ is the density of the medium (water), μ is the dynamic viscosity of the medium.

Pic. 9 shows the dependence of the time of formation of motion on the radius of the rotor for different values of the inter-rotor distance.

2. Generator circuits and layout options

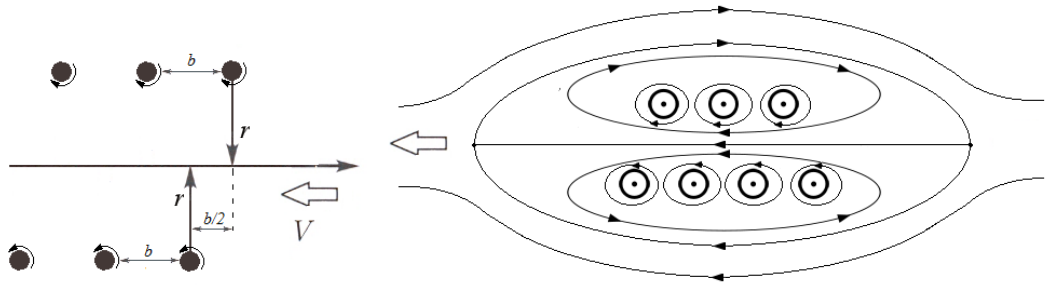
The toroidal vortex has the best characteristics as a propulsive device (Pic. 2), which has minimal

dissipative losses and maximum lifetime in the absence of an initiating source of rotation. However, a toroidal vortex can arise and exist only in a homogeneous medium, with reference to the conditions of our theme – in an atmosphere or an aqueous layer of thickness at least an order of magnitude larger than the torus. At the interface, for example, on the surface of water, a toroidal vortex is essentially impossible. The simplest generator of the toroidal vortex is a rotating toroidal shell. In this case, the hull of the vessel is placed (built in) inside such a shell. The structural and technological realization of such airships (dirigibles) and water vessels (in this case always underwater vessels) due to the originality of most structural elements is obviously connected with a number of technical (engineering) problems.

The simplest generator of a surface vortex pair are two vertical rotating (in mutually opposite directions) cylinders, which ultimately realize a semi-toroidal vortex (Pic. 3). However, on such a separate pair of cylinders, it is not possible to mount a body of a surface vessel without additional supports in the water. Two or more pairs of cylinders allow the platform to be mounted in the above-water part (supported on the axis of the cylinders) as a bearing element of a surface vessel [10]. Essentially, there are no obvious limitations on the shape and carrying capacity (displacement) of the platform. As the diameter of the cylinders increases, the displacement and stability of the vessel increase and a greater efficiency of the motion of the vortex pair is realized.

Vortex generators can be, for example, cylinders arranged in the form of two parallel rows on which the supporting platform (housing) is placed. Such a design assumes the formation of two vortex chains, and the vortex generators (cylinders) can be arranged in two ways: each vortex generator of one row is placed opposite the cylinder of the other row (Pic. 11)





Pic. 12. Displacement of vortex generators and current flow diagrams.

or placed opposite the middle of the interval between two neighboring cylinders of the other row (Pic. 12).

Each of these systems will also move forward with speeds:

For a symmetrical arrangement

$$V = \frac{G}{2b} \operatorname{cth} \frac{\pi 2r}{b}, \quad (12)$$

For shifted location

$$V = \frac{G}{2b} \operatorname{th} \frac{\pi 2r}{b}, \quad (13)$$

where b is the distance between neighboring vortex generators.

The stability of the systems of these different arrangements of vortices relative to each other was studied by Karman. It was proved that the symmetrical arrangement is unstable, that is, with the passage of time, the vortices shift from positions corresponding to the unperturbed state. The displaced location is stable, and therefore does not require additional energy costs to overcome the forces displacing the vortices. The stability condition obtained by Karman has the form [11]:

$$\frac{2r}{b} = 0,2806. \quad (14)$$

With the number of pairs of cylinders larger than two, the optimization of their number and mutual arrangement becomes a separate independent task.

Conclusions.

1. A targeted survey analysis of the flows generated by the vortex pair was carried out. From the fact of the continuity of the distribution of the velocity of the medium in the neighborhood of the pair, a consequence is pointed out that the region of closed motion moves in an environment without frontal resistance.

2. Principal schemes of the layout of air and submarine vessels with the placement of vessel's hulls inside the generators of vortex pairs are proposed. For surface vessels, a scheme is proposed for the hull of the ship outside the water with support on the axis of the immersed cylinders – vortex pair generators.

Vessels performed according to the proposed schemes do not experience drag when moving.

3. It is shown that the power required to move ships executed according to the proposed schemes is several (5–7) orders less than the power consumed by traditional vessels.

4. Estimates of the energy required for the formation of steady motion in the region of a closed flow in the vicinity of the vortex pair and the time of its formation are performed.

REFERENCES

1. Simanovich, A. I. Construction of the hull of fishing vessels [Konstrukcija korpusa promyslovyh sudov]. Moscow, MIR publ., 2005, 584 p.
2. Either a mast, or a sail [To li machta, to li parus]. Populjarnaja mehanika, 2011, Iss. 101, pp. 80–84.
3. Ilyin, A. Sailboats without sails [Parusniki bez parusov]. Junyj tehnik, 2007, Iss. 5, pp. 65–69.
4. Kozlov, V. V. The general theory of vortices [Obshhaja teorija vihrej]. Izhevsk, Udmurt university, 1998, 238 p.
5. Sedov, L. I. Continuum Mechanics [Mehanika splashnoj sredy]. Vol. 2. Moscow, Nauka publ., 1970, 568 p.
6. Lamb, G. Hydrodynamics [Gidrodinamika. Trans. from English]. Moscow, OGIZ publ., 1947, 929 p.
7. Sir Thomson W. (Lord Kelvin). The translatory velocity of circular vortex ring. Phil. Mag. (4), 1867, Vol. 33, pp. 511–512.
8. Helmholtz, G. Fundamentals of the vortex theory [Osnovy vihrevoj teorii]. Izhevsk, Institute of Computer Studies, 2002, 82 p.
9. Schlichting, G. The theory of the boundary layer [Teorija pogranichnogo sloja]. Moscow, Nauka publ., 1969, 744 p.
10. Nedorub, S. A., Ostroukhov, N. N. The vehicle propulsor [Dvizhitel' transportnogo sredstva]. Patent No. 1533948, USSR. Appl. No. 4286395 / 27–11 dated 17.07.1987. Publ. 07.01.1990. Bul. № 1.
11. Kochin, N. E., Kibel, I. A., Roze, N. V. Theoretical hydromechanics [Teoreticheskaja gidromehanika]. Part 1. Moscow, 1963, 584 p.

Information about the authors:

Ostroukhov, Nikolai N. – Ph.D. (Physics and Mathematics), senior researcher, associate professor of the department of Applied Mathematics, Information Technology and Electrical Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, vtvnukde@mail.ru.

Chumakova, Ekaterina V. – Ph.D. (Physics and Mathematics), associate professor of the department of Applied Mathematics, Information Technologies and Electrical Engineering of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, ekat.v.ch@rambler.ru.

Article received 14.11.2016, accepted 28.12.2016.