

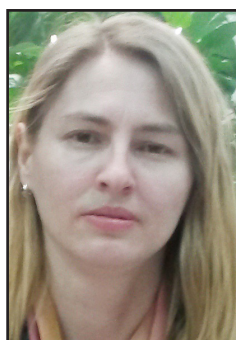


Вихревые двигатели водных и воздушных судов



Николай ОСТРОУХОВ
Nikolai N. OSTROUKHOV

Екатерина ЧУМАКОВА
Ekaterina V. CHUMAKOVA



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 двигателями в виде генераторов вихревых пар, в том числе тороидальных вихрей (термик).

Показано, что эффективность таких двигателей увеличивается с увеличением их габаритов, так что в случае надводных судов двигатели обеспечивают плавучесть транспортного средства, возможность размещать полезный объем в надводной части, а в случае воздушных и подводных судов – внутри двигателя. 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.

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.

Практически все современные водные и воздушные транспортные средства (суда) выполнены по раздельной схеме «двигатель – корпус судна», при которой двигатель 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 двигатель.

С ростом габаритов транспортных средств и скоростей их перемещения указанные силы сопротивления увеличиваются, и пропорционально их произведению возрастает мощность, необходимая 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 (объём) 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]:

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

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

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-

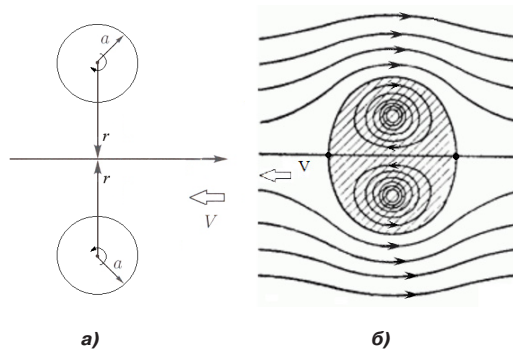


Рис. 1. Схема генераторов вихревой пары (а) и линий тока в ее окрестности (б).

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]:

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

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],

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

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

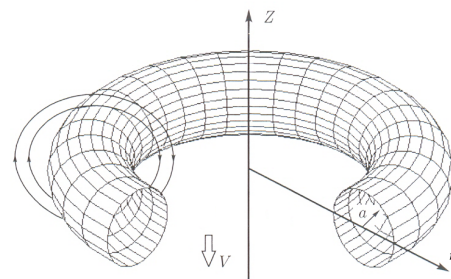


Рис. 2. Тороидальный вихрь.



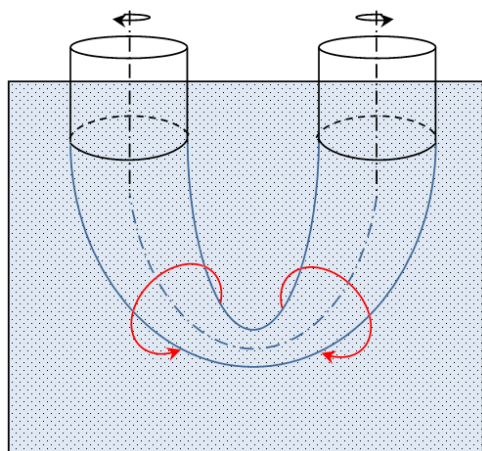


Рис. 3. Смыкание двух приповерхностных линейных вихрей с образованием полутороидального вихря.

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

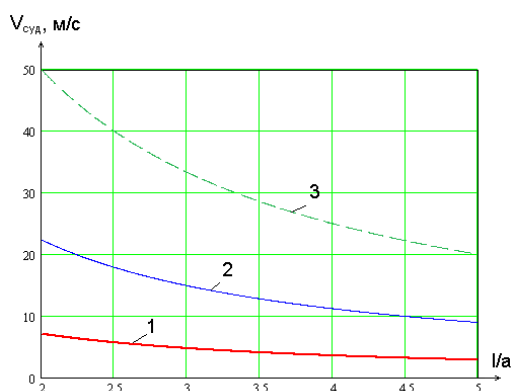


Рис. 4. Зависимость скорости поступательного движения от отношения l/a (отношения межроторного расстояния к радиусу ротора) – $p_0 = 1$ атм (1); 10 атм (2); 50 атм (3).

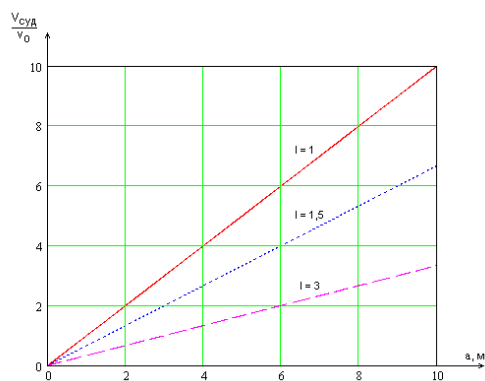


Рис. 5. Зависимость безразмерной скорости движения судна от радиуса ротора для различных значений межроторного расстояния.

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 $\Gamma_0 = \text{const}$ 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 $\frac{V_{\text{суд}}}{v_0}(a)$ для нескольких l – значений межроторного расстояния.

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

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

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

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

На рис. 6 приведена зависимость потребляемой мощности на поддержание

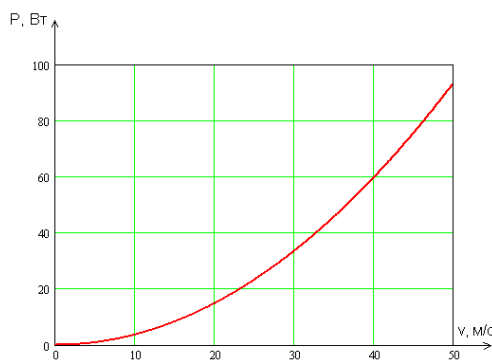


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности от скорости движения, необходимой для поддержания вихрей.



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).

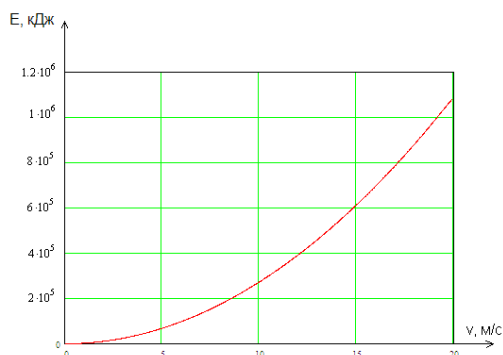


Рис. 8. Зависимость энергии, затрачиваемой на раскрутку вихрей, от скорости движения вихревой пары.

Толщина погранслоя δ оценивается из соотношения:

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

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

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

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

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

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

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



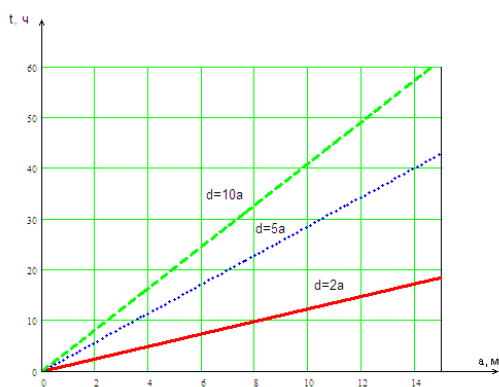


Рис. 9. Зависимость времени формирования движения от радиуса ротора.

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-

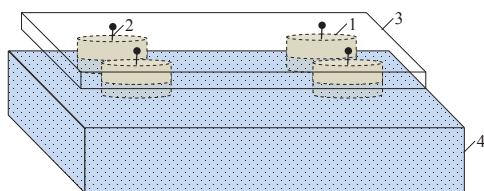


Рис. 10. Схема реализации судна на двух вихревых парах, получаемых вертикально вращающимися цилиндрами: 1 — ротор, 2 — опора, 3 — платформа, 4 — среда (вода).

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

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

для смещенного расположения

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

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]:

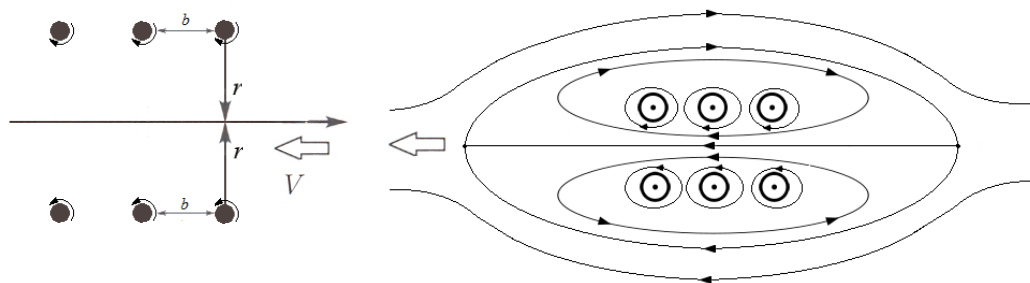


Рис. 11. Симметричное расположение генераторов вихрей и схемы линий тока.

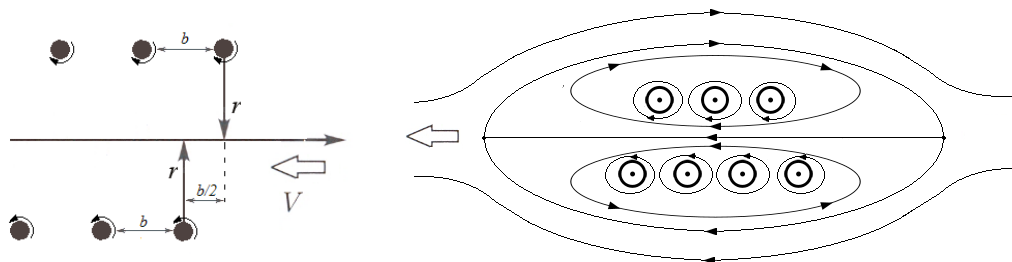


Рис. 12. Смещенное расположение генераторов вихрей и схемы линий тока.

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

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, потребная 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 промысловых 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.** — vtnukde@mail.ru, **Чумакова Е. В.** — ekat.v.ch@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 14.11.2016, принята к публикации 28.12.2016.

