



Инженерия и моделирование оптимального маневрирования судов с вихревыми двигателями



Николай ОСТРОУХОВ
Nikolai N. OSTROUKHOV

Екатерина ЧУМАКОВА
Ekaterina V. CHUMAKOVA



Остроухов Николай Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики, информационных технологий и электротехники МАИ, Москва, Россия.

Чумакова Екатерина Витальевна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики, информационных технологий и электротехники МАИ, Москва, Россия.

Engineering and Modelling of Optimal Maneuvering of Ships with Vortex Propulsion Units

(текст статьи на англ. яз. —
English text of the article — p. 22)

В статье представлено расчётно-теоретическое моделирование процессов маневрирования судов, оснащённых вихревыми двигателями, обоснованы гидродинамические принципы манёвра при изменении режимов генераторов вихрей и кинетической энергии, показаны способы раскрутки воды в зоне замкнутого течения («присоединённой массы») при переходе судна из состояния покоя в режим устоявшегося движения.

Предложены принципиальная схема дополнительного устройства к вихревым двигателям и алгоритмы компьютерного моделирования его использования для различных вариантов маневрирования.

Описаны преимущества судов с генераторами вихревых пар, в том числе тороидальных вихрей (термиков), эффективность двигателей которых увеличивается с ростом их габаритов.

Ключевые слова: водный транспорт, вихревые двигатели, кинетическая энергия, надводное судно, подводное (тороидальное) судно, лобовое сопротивление, течение в окрестности вихревой пары, лопатка, ротор, моделирование, оптимальный манёвр.

Преимущества вихревых двигателей [1–3] наиболее полно реализуются в установившемся режиме движения судов, т.е. с постоянной по значению и направлению скоростью. Такие суда практически не испытывают лобового сопротивления и потребляемая ими мощность на несколько порядков меньше, чем у судов, выполненных по традиционной схеме «корпус—двигатель», располагаемых друг за другом [4].

Природа преимуществ судов, описанных в [1], состоит в том, что двигатель не «проталкивает» корпус судна и себя сквозь воду или воздух, а будучи генератором вихревой пары [4] и погружённым в области замкнутого течения в окрестности этой пары, перемещается вместе с ней.

Отсутствие же лобового сопротивления при этом объясняется тем, что во всем пространстве вокруг вихревой пары реализуется течение с непрерывным распределением скорости (без скачков) [5–7]. Мощность, необходимая на поддержание такого течения и, собственно, на движение судна, обусловлена только диссипативными потерями, т.е. на вязкое трение на поверхности (границе) «генератор вихря — среда». Сле-

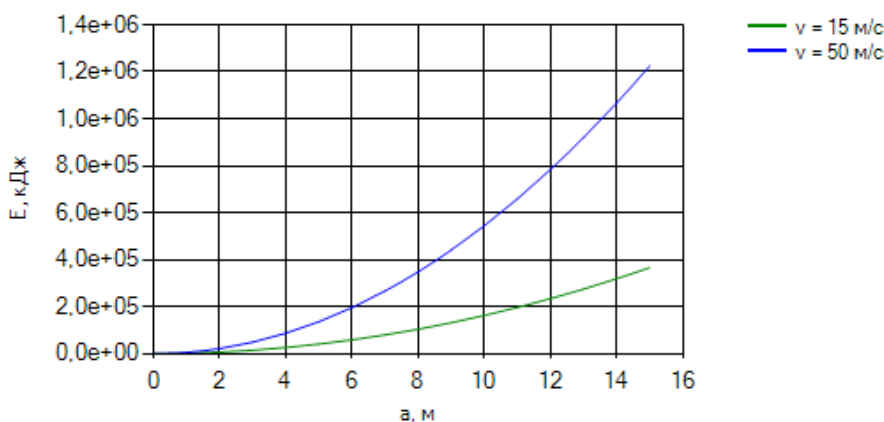


Рис. 1. Зависимость удельной (на погонный метр генератора) кинетической энергии «присоединённой массы» от радиуса генератора вихря.

дует напомнить, что у надводных судов с вихревыми движителями корпус располагается над поверхностью воды, а плавучесть судна обеспечивается объёмом генераторов вихрей, погруженных в воду.

Прочный корпус подводного судна имеет форму пустотелого герметичного тора, а его движителем и генератором вихря является сравнительно тонкостенная тороидальная оболочка, эквидистантная наружной поверхности корпуса и установленная с возможностью вращения относительно корпуса. Поскольку линейная скорость наружных поверхностей генераторов имеет кавитационные ограничения [1, 8], определяемые абсолютным давлением в водной среде, подводные суда с вихревыми движителями могут развивать скорость, существенно превышающую скорость надводных.

Очевидно, что масса воды (воздуха в случае дирижабля) в области замкнутого течения обладает кинетической энергией

$$E = \frac{\rho}{2} \oint_{\Omega} v(r)^2 d\Omega, \quad (1)$$

где Ω — «присоединённый объём» воды, т.е. объём области замкнутого течения.

Для оценки E можно использовать соотношение

$$E = Dv^2, \quad (1')$$

где D — водоизмещение судна (кг), v — скорость его поступательного движения в установившемся режиме.

Указанная кинетическая энергия сообщается от генератора вихря присоединённой массе в течение всего времени от запу-

ска приводного движителя до выхода судна на установившийся режим. Значение E может быть весьма велико, причем тем больше, чем больше размер (водоизмещение) судна, так что генератор вихря, рассчитанный только на компенсацию диссипативных потерь, может сообщить эту энергию «присоединённой массе» за очень большое, возможно даже неприемлемое, время [1].

Из сказанного понятна необходимость разработки методов и устройств минимизации времени выхода на установившийся режим вихревых движителей судов.

1. Схемы изменения режимов вращения генераторов вихрей, обеспечивающих маневрирование судов, и потребные для этого энергозатраты.

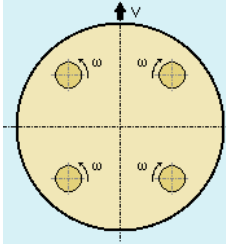
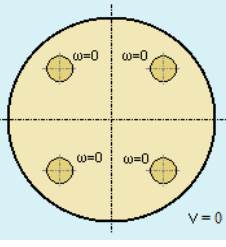
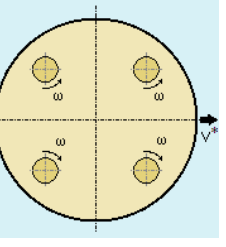
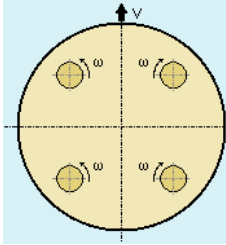
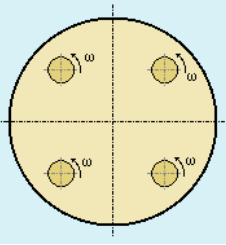
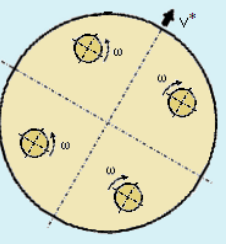
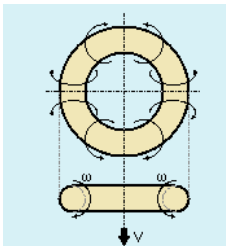
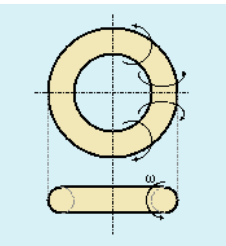
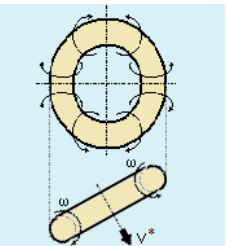
Поскольку вектор скорости $\vec{V}$ движения судна однозначно определяется конфигурацией течения «присоединённой массы» воды в замкнутой области, наиболее естественным способом воздействия на вектор представляется изменение характера непосредственно течения.

Вполне очевидно, что для изменения скорости движения на противоположную достаточно изменения на противоположные угловых скоростей вращения всех генераторов вихрей, что легко реализуемо как для надводных, так и подводных судов. Схемы изменения вращения роторов для коррекции вектора скорости на углы, отличные от π , для надводных судов с двумя роторными парами и для подводных судов представлены в таблице 1.



Таблица 1

Сводная таблица изменений режимов вращения генераторов вихрей

Тип судна		Исходный режим	Переходный режим	Установившийся режим (после маневра)	Вектор скорости после маневра
		a	b	c	
Надводное судно	Поворот судна и вектора скорости на угол $\pi/2$				$V^* = V \exp\left(i\frac{\pi}{2}\right)$
	Поворот судна и вектора скорости на угол ϕ				$V^* = V \exp(i\phi)$ $\phi = k\omega\tau$
Подводное судно	Поворот судна и вектора скорости на угол ϕ				$V^* = V \exp(i\phi)$ $\phi = k\omega\tau$

Изменение направления вектора $\vec{V}$ на угол $\pi/2$ (таблица 1, строка I) достигается изменением на противоположные вращений двух роторов, расположенных по диагонали, т.е. роторов различных вихревых. При таком маневре корпус надводного судна не поворачивается и в результате движется «боком». Пространственная ориентация судна, включая систему роторов генераторов вихрей, не изменяется.

Поворот вектора скорости на угол от 0 до $\pi/2$ (таблица 1, строка II) достигается включением на некоторое время τ вращения всех роторов в одном направлении. При таком режиме судно, как целое, приобретает угловую скорость вращения ω^* , встречную к скоростям вращения роторов ω . Для более точной регулировки (ω^*) в одну сторону можно вращать не все, а любое не скомпенсированное число роторов. В результате судно разворачивается на угол $\phi = \omega^*\tau$.

Поскольку вектор скорости подводного (тороидального) судна ориентирован перпендикулярно срединной плоскости тора, для поворота вектора $\vec{V}$ на любой угол, отличный от π , следует менять ориентацию срединной плоскости. Для этого достаточно изменить режим вращения диаметрально противоположных секций вращающейся оболочки подводного судна (таблица 1, строка III). Поворот судна, как целого, на определённый угол является протяжённым во времени процессом, в отличие от маневров с изменением направления вектора $\vec{V}$ на углы π и $\pi/2$, представляющих собой набор отдельных дискретных действий (остановка и раскрутка роторов).

Маневр с поворотом на углы $0 \leq \phi < \pi/2$ надводных и на произвольные углы подводных судов осложняется необходимостью учёта инерционности, состоящей в том, что режим вращения роторов, инициирующих поворот судна, требуется за-

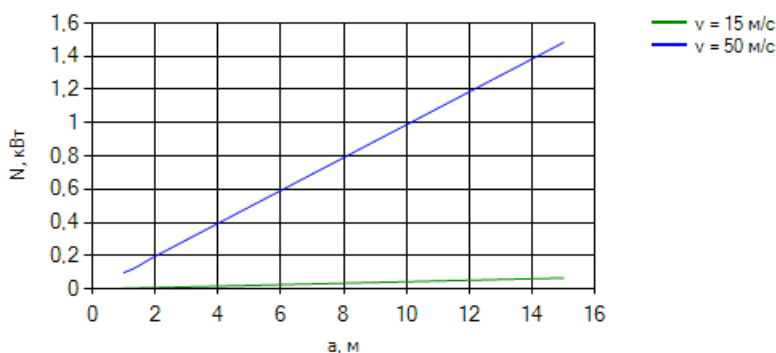


Рис. 2. Зависимость удельной (на погонный метр генератора вихря) мощности, передаваемой среде гладким ротором генератора вихря от радиуса генератора вихря.

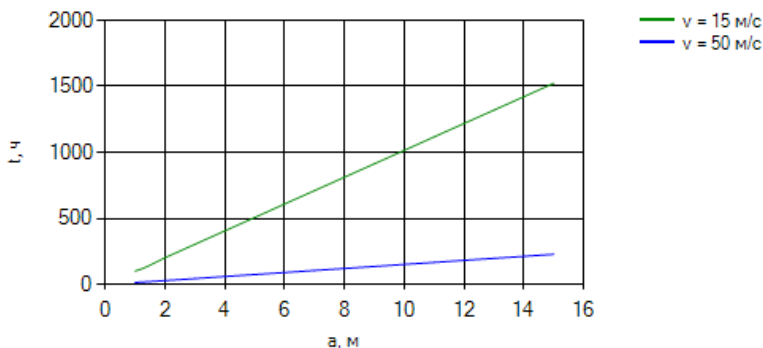


Рис. 3. Оценка времени раскрутки «присоединённой массы» гладким ротором.

медлять или прекращать до достижения заданного угла поворота, чтобы этот угол достигался вращением по инерции.

Энергозатраты на маневр в первом приближении равны удвоенной величине кинетической энергии в области замкнутого течения генераторов всех вихревых пар. Это обусловлено тем, что для сокращения времени маневра любое изменение режима вращения предполагает сначала принудительное прекращение вращения воды, установившегося до начала маневра, а затем раскрутку в новом направлении.

2. Предельные оценки времени формирования замкнутого течения.

Исходными данными для предельных оценок времени формирования замкнутого течения в окрестности вихревого движителя являются кинетическая энергия присоединенной массы среды в установившемся режиме E и мощность P , передаваемая среде от генератора вихря, выполненного по нескольким (по крайней мере, двум) конструктивным схемам.

Минимальная мощность, передаваемая жидкости, соответствует случаю гладкого цилиндрического ротора диаметра $d = 2a$, вращающегося в воде с угловой скоростью ω . Оценка сверху этой мощности – случай вращения в неподвижной воде.

Сила, действующая на один погонный метр ротора [9]:

$$F_{mp} = \mu 2\pi a \operatorname{grad} u, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, а максимальный градиент скорости определяется следующим образом [10]:

$$\operatorname{grad} u = \frac{v_{\max}}{\delta}. \quad (3)$$

Толщина пограничного слоя δ оценивается из соотношения

$$\delta = \frac{L}{\sqrt{\operatorname{Re}}}, \quad (4)$$

где L – характерный линейный размер обтекаемого тела, Re – число Рейнольдса, которое определяется формулой

$$\operatorname{Re} = \frac{2\pi a \rho u}{\mu}. \quad (5)$$

Однако величина $\operatorname{grad} u$ уменьшается пропорционально расстоянию удаления от поверхности ротора, поэтому в качестве средней оценки примем $\operatorname{grad} u = \frac{v_{\max}}{a}$.

Мощность, затрачиваемая на стадии раскрутки роторов, можно оценить из следующего соотношения:

$$N = F_{mp} v_{\max} = \mu 2\pi a \operatorname{grad} u. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена зависимость от радиуса ротора мощности, передаваемой



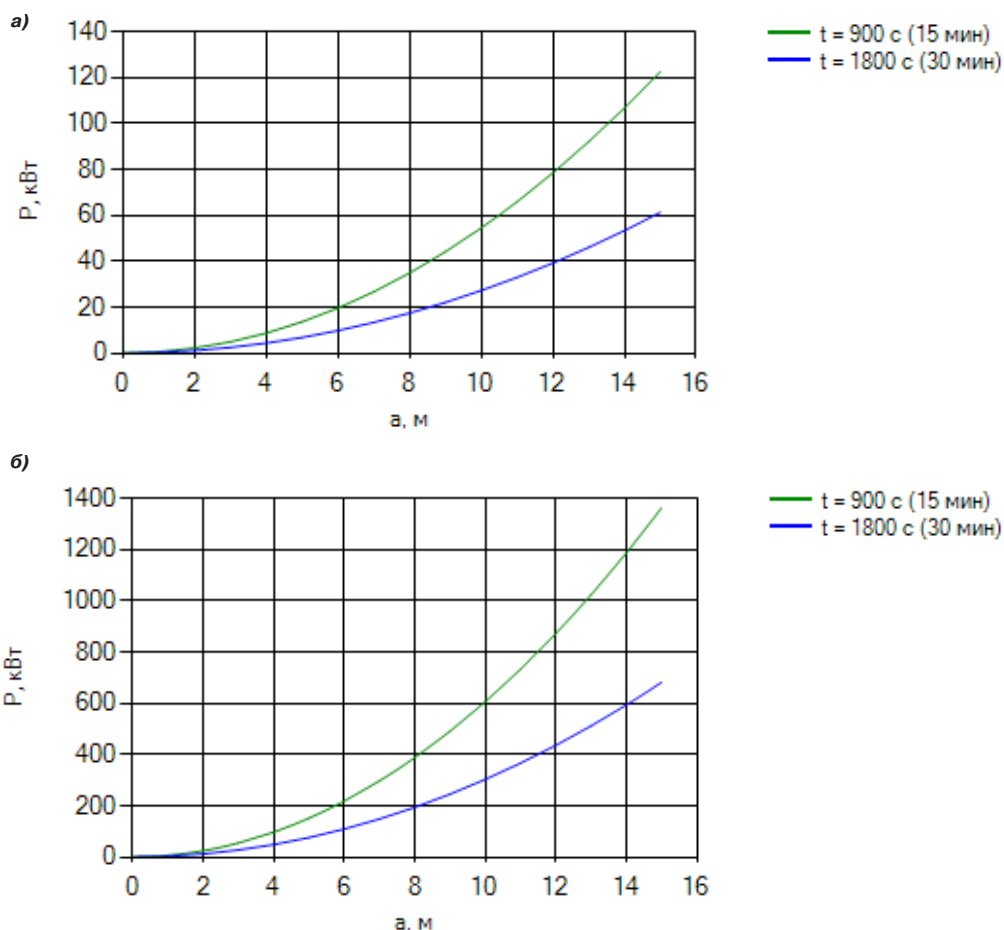


Рис. 4. Зависимость затрачиваемой мощности от радиуса ротора при заданном времени раскрутки (а – для надводного судна, б – для подводного судна).

неподвижной воде, а на рис. 3 – оценка времени раскрутки «присоединённой массы», $t = E/N$. Видно, что такой вариант практически неприемлем.

Другую оценку мощности, обеспечивающую раскрутку «присоединённой массы», можно сделать, задавшись приемлемым временем t , необходимым для начала движения, порядка 30 минут. На рис. 4 представлены расчётные зависимости потребной мощности для времени разгона 15 и 30 минут.

Простейший способ передачи такой увеличенной мощности – введение в конструкцию одной или нескольких лопаток. В случае одной лопатки, ориентированной в радиальном направлении ротора, при этом длинной, равной длине, образующей ротор, сила, действующая на неё при вращении ротора в неподвижной воде, составляет:

$$F_r = \frac{\rho v^2(r) S}{2}, \quad (7)$$

где $v(r)$ – местная линейная скорость лопатки, равная ωr ; r – радиальная координата лопатки; S – её площадь. Соответственно максимальная мощность, передаваемая лопаткой воде:

$$P = F_r v(r) = \frac{\rho v^3(r) S}{2}. \quad (8)$$

На рис. 5 представлены зависимости ширины одной лопатки, способной передать воде ранее определённую мощность $L(P)$, для различных радиусов роторов.

Можно показать, что мощность, передаваемая лопаткой, т.е. потребная на перестройку течения воды в области замкнутого течения, по крайней мере, на порядок меньше мощности, необходимой судну традиционной раздельной компоновки «корпус–двигатель» на преодоление ло-

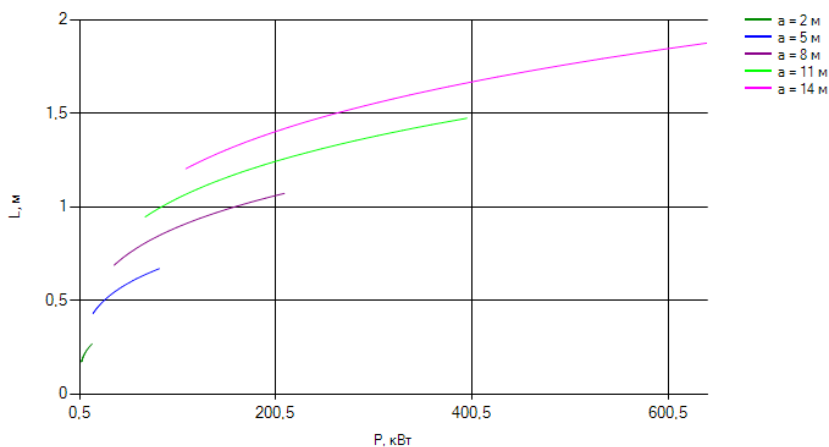


Рис. 5. Зависимость ширины продольной лопасти от мощности необходимой для разгона «присоединённой массы».

бового сопротивления с поперечным сечением корпуса порядка a^2 , и оценивается величиной отношения ширины лопасти к этому поперечному размеру — s/a .

3. Управляемый блок выдвижных лопаток с регулируемым углом атаки.

Лопатка с размерами, определенными в предыдущем разделе, передают воде рассчитанную мощность только непосредственно в момент запуска вращения ротора, когда вода неподвижна относительно лопатки и скоростной напор определяется скоростью движения лопатки. По мере разгона воды скорость лопатки относительно неё уменьшается на скорость воды и соответственно уменьшаются скоростной напор среды и мощность, передаваемая воде. Компенсировать снижение скоростного напора увеличением скорости лопатки нельзя, ибо линейная скорость лопатки не должна существенно отличаться от местной скорости воды в установившемся режиме. Наиболее очевидным способом увеличения передаваемой мощности в условиях непрерывно уменьшающейся разности скоростей лопатки и воды является увеличение эффективной площади лопатки. Кроме того, сравнительно ясно, что радиус вращения лопатки не должен оставаться неизменным в течение всего времени раскрутки «присоединённой массы», поскольку передача импульса непосредственно лопаткой отдельным слоям воды эффективнее, нежели передача этого импульса от одного из роторов вследствие вязкости. Другими словами, эффективная

раскрутка присоединенной массы каким-либо механическим устройством неизменной конфигурации невозможна.

На рис. 6 описана принципиальная схема управляемого блока выдвижных лопаток с регулируемым углом атаки.

В исходном состоянии лопатки, выполненные в форме длинных и сравнительно толстых пластин, располагаются в углублениях (пазах) внешней поверхности ротора генератора вихревой пары, так что одна их боковых поверхностей находится заподлицо с цилиндрической поверхностью ротора (рис. 7).

Каждая из лопаток закреплена на конце выдвижного штока с возможностью поворота. Длина хода штока в радиальном направлении несколько (приблизительно на ширину лопатки) меньше расстояния от поверхности ротора до ближайшей границы области замкнутого течения.

Раскрутка «присоединённой массы» описанным блоком лопаток осуществляется следующим образом. Для привода ротора с блоком лопаток используется двигатель фиксированной мощности, задаваемой по времени раскрутки. Оболочка ротора приводится во вращение с расчётной угловой скоростью ω_0 . Программно-управляемый механизм выдвижения штоков поворачивает лопатки так, чтобы эффективная площадь обтекания последней соответствовала расчётной ширине одиночной лопатки, определенной в п. 2 (вариант — лопатка ориентируется либо по силе сопротивления, либо по мощности). Скорость выдвижения ло-



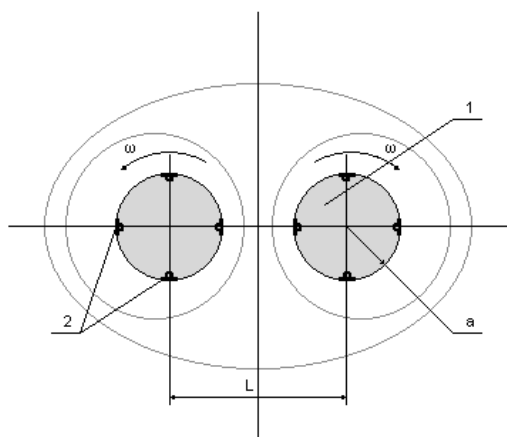


Рис. 6. Принципиальная схема управляемого блока выдвижных лопаток:
1 – ротор генератора вихря, 2 – лопатки в режиме установившегося движения, а – радиус ротора, L – расстояние между роторами.

патки и последующего втягивания определяется по задаваемому времени раскрутки t : половину времени – на выдвижение и столько же – на возврат.

В процессе раскрутки угловая скорость вращения ротора изменяется по закону $\omega = \omega \cdot a/r$, где r – мгновенное значение радиуса, где находится центр лопатки.

Управление описанным блоком лопаток осуществляется на основе сравнения программных (расчётных) значений мощности, расходуемой на разгон воды, положения и ориентации лопаток, угловой скорости вращения ротора, скорости воды в различных точках области замкнутого течения и их фактических (измеренных) значений.

4. Разработка программного обеспечения моделирования механизма раскрутки «присоединённого объёма» среды.

Приведенные ранее графики являются справедливыми для узкого класса судов с определенными габаритными характеристиками. Очевидно, что нужен инструментарий в виде программного обеспечения, позволяющий получать оценочные характеристики выхода на стационарный (крейсерский) режим исходя из задаваемого типа судна (надводного или подводного) и его габаритных характеристик (водоизмещения). На основании изложенного математического аппарата можно формировать алгоритмическую последовательность вычисления характеристик, которые можно использовать в управлении судном. На

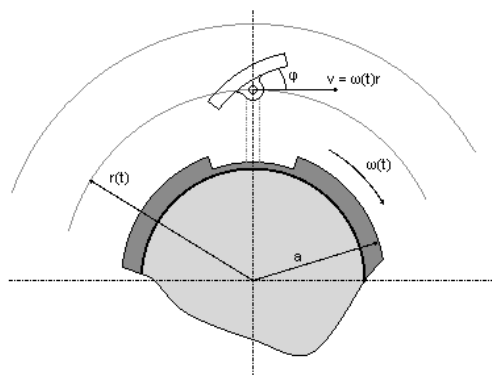


Рис. 7. Схема ротора с выдвижной лопаткой.

рис. 8 приведено окно разрабатываемого приложения.

Программное управление должно заключаться в том, что на основе полученных с датчиков измерений либо силе, действующей на лопатку, либо мощности, затрачиваемой на движение лопатки в воде, определяется эффективная ширина лопатки, отвечающая углу атаки в каждый момент времени раскрутки воды.

Для каждого размера судна находится ширина лопатки, достаточная для разгона судна за минимальное время. Эта ширина может оказаться неприемлемой для конструкции ротора, так как ширина лопатки должна быть много меньше радиуса ротора ($L \ll a$). Если по оценкам это условие не выполняется (при недостаточной мощности), надо использовать несколько лопаток в конструкции ротора, что позволит уменьшить их ширину. Причём в процессе управления следует учитывать синхронность их выдвижения и изменения углов атаки каждой для оптимального расхода мощности, затрачиваемой при раскрутке «присоединённой массы» воды.

ВЫВОДЫ

Выполнено расчётно-теоретическое моделирование процессов маневрирования водных судов с вихревыми движителями:

- сформулированы гидродинамические принципы маневрирования судов посредством изменения режимов вращения отдельных элементов генераторов вихрей;

- показано, что для эффективного использования вихревых движителей крупногабаритных подводных и надводных судов необходимо принятие специальных мер для

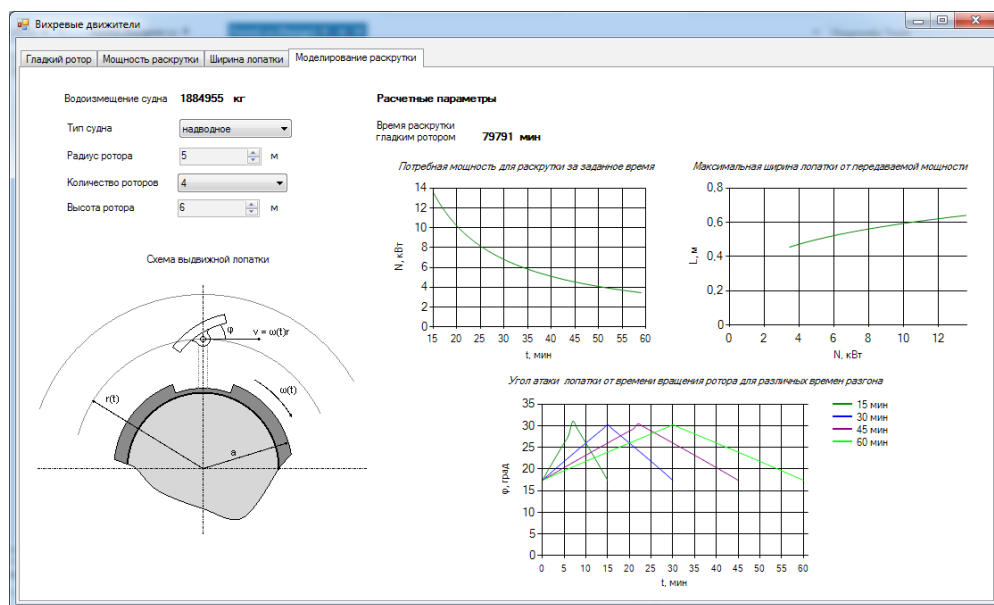


Рис. 8. Окно приложения, моделирующего алгоритм механизма раскрутки «присоединённого объёма» среды.

обеспечения разгона (раскрутки) воды в области замкнутого течения («присоединённой массы») за заранее задаваемое и приемлемое время, что, в свою очередь, требует реализации режима работы движителя, существенно отличного от его нагрузки при движении судна с установившейся скоростью;

— для судов с вихревыми движителями обоснована необходимость использования специальных устройств для раскрутки воды в области замкнутого течения («присоединённой массы») при переходе судна из состояния покоя в режим установившегося движения;

— предложена конструктивная схема управляемого блока выдвижных лопаток с регулируемым углом атаки, монтируемого на роторе генератора вихрей, обеспечивающая изменение режима течения «присоединённой массы» воды за задаваемое время;

— показано, что мощность, необходимая для совершения маневров судов с вихревыми движителями (нужная в сравнительно малые промежутки времени), не превышает мощности, необходимой для преодоления лобового сопротивления судов традиционной компоновки того же водоизмещения;

— разработано программное обеспечение для оценки режима раскрутки «присоединённого объёма» среды; моделирование распределения скорости воды в области замкнутого течения позволило сформировать управляющие зависимости — значения углов атаки лопатки от заданного времени изменения режима течения «присоединённой массы» воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остроухов Н. Н., Чумакова Е. В. Вихревые движители водных и воздушных судов // Мир транспорта. — 2016. — № 6. — С. 86–91.
2. Недоруб С. А., Остроухов Н. Н. Движитель транспортного средства. Патент СССР № 1533948, заяв. № 4286395/27–11 от 17.07.1987. Публ. 07.01.1990.
3. Остроухов Н. Н., Чумакова Е. В. Подводное или воздушное (дирижабль) судно. Заявка на изобретение № 2017122033 от 22.06.2017.
4. Симанович А. И. Конструкция корпуса промышленных судов. — М.: Мир, 2005. — 584 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. Faber T. E. Fluid Fluid Dynamics for Physicists. Cambridge University Press, 1995.
8. Sir Thomson W. (Lord Kelvin). The translatory velocity of circular vortex ring // Phil. Mag. (4). — 1867. — Vol. 33. — Pp. 511–512.
9. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — Часть 1. — М., 1963. — 584 с.
10. Schlichting H. Boundary-layer theory. New York: McGraw-Hill, 1979. 817 p.

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

Статья поступила в редакцию 24.08.2017, принята к публикации 21.10.2017.

