

DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-50-58

УДК 519.673-73:629.12

ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ЭФФЕКТИВНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СУДОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГРЕБНОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ГИДРОАЭРОДИНАМИКИ

Н.М. Якимов¹, С.Д. Попов², С.Н. Чувашев¹

¹МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского, Москва, Российская Федерация
e-mail: root@livid.pp.ru; snchuv@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: unesco-tvet-01@yandex.ru

Рассмотрена возможность применения гребного колеса при повышенных скоростях движения судна, при этом учтена не только гидродинамика лопаток, но и аэродинамическое сопротивление колеса в целом. Для случая колеса, вынесенного за обводы судна, показана необходимость применения обтекателя, прикрывающего колесо от встречных потоков воздуха. Обнаружен эффект создания разрежения под обтекателем с большой степенью изоляции колеса от внешнего воздуха, имеющий следствием дополнительное кормовое аэродинамическое сопротивление. Показана эффективность одновременного применения горизонтальных рефлекторов, расширенного выходного и широкого входного каналов обтекателя. Достигнуты рекордные значения тяговой эффективности колеса (около 50 %) с учетом аэродинамики при скоростях до 45 км/ч.

Ключевые слова: гребное колесо, высокоскоростной движитель, вычислительный эксперимент, аэродинамическое сопротивление, эффективность.

AERONAUTICS BASED DETERMINATION OF GEOMETRY OF A HIGH-SPEED SHIP ROWING WHEEL UNIT

N.M. Yakimov¹, S.D. Popov², S.N. Chuvashov¹

¹Moscow State Aviation Technological University – Russian State University of Technology named after K.E. Tsiolkovsky, Moscow, Russian Federation
e-mail: root@livid.pp.ru; snchuv@mail.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: unesco-tvet-01@yandex.ru

The article considers the possibility of using a rowing wheel at higher speeds of the ship. The hydrodynamics of flows over the blades is considered along with the aerodynamic drag of the whole wheel. In the case of a wheel positioned outside the ship body, it is necessary to use the fair water protecting the wheel from approaching air flows. For a shell with a good separation of the wheel from the outside airflow, an effect of rarefaction is observed. This effect causes an additional boat-tail aerodynamic drag. The article shows the efficiency of using the horizontal reflectors in combination with wide outlet and inlet channels of the shell. Record-breaking efficiency of the rowing wheel is achieved at the ship speed up to 45 km/hour, which estimated up to 50 %.

Keywords: rowing wheel, higher speed of the ship, computational experiment, aerodynamic drag, efficiency.

В связи с задачей освоения Крайнего Севера возник значительный интерес к построению амфибийных судов, пригодных для движения по глубокой и мелкой воде, болотам, снегу и льду [1]. При построении таких судов в качестве движителей значительные преимущества имеют гребные колеса. Такие движители отличаются высокой тяговой эффективностью при малых скоростях движения ($v_v = 10 \dots 20$ км/ч), при больших скоростях тяговый КПД спадает [2].

Однако такой уровень скоростей представляется недостаточным. Повышение скорости связано не только с ускорением транспортировки грузов и/или пассажиров, но и со значительным повышением дальности автономного плавания, экономией горючего, увеличением полезной нагрузки: при превышении критической скорости судна, составляющей обычно $v_v^* = 25 \dots 35$ км/ч, могут значительно снижаться затраты энергии на взаимодействие с водой.

Последние наши разработки, связанные с задачами, частично описанными в [1], указывают на принципиальную возможность создания колесных движителей, в которых гидродинамические процессы оптимизированы так, что их эффективность остается высокой при скоростях до $v_v^* = 40 \dots 50$ км/ч.

Однако при повышении скорости возникают новые проблемы. Гребные колеса, как правило, имеют большие габаритные размеры [3], что может воздействовать на аэродинамические характеристики судов. Если для относительно тихоходных судов ($v_v^* = 10 \dots 20$ км/ч) взаимодействие с воздухом играет второстепенную роль в общем сопротивлении движению, то при повышении скорости судна до $v_v^* = 40 \dots 50$ км/ч, аэродинамическое сопротивление выходит на первый план и его необходимо учитывать при выборе геометрии движителя как заметной части обтекаемого воздухом судна. Причем, как показано далее, недостаточно решать только аэродинамическую задачу, так как при высоких скоростях может возникать существенное нелинейное взаимодействие воздушной и водной сред.

В вычислительном эксперименте решалась система уравнений Навье–Стокса для динамики воздуха и воды как среды с переменной плотностью с учетом силы тяжести и моделью турбулентности SST (вариант $(k-\omega)$), в приближении изотермичности и малости числа Маха по сравнению с единицей [4]:

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}) = 0;$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)(\rho \mathbf{U}) - \mu_{eff} \Delta \mathbf{U} = (\rho = \rho_{eff}) \mathbf{g} - \nabla p';$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t;$$

$$p' = p + \frac{2}{3}pk;$$

$$\sum_{\alpha} \nabla \cdot (r_{\alpha} \mathbf{U}) = 0;$$

$$\rho = \sum_{\alpha} r_{\alpha} \rho_{\alpha}, \quad \mu = \sum_{\alpha} r_{\alpha} \mu_{\alpha};$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + p_k - \beta' \rho k \omega;$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + a_3 \frac{\omega}{k} p_k - \beta_3 \rho \omega^2;$$

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)};$$

$$p_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right);$$

$$F_1 = \tanh(\xi_1^4);$$

$$\xi - 1 = \min \left(\xi_2, \frac{4\rho k}{C D_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2} \right);$$

$$C D_{kw} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1, 0 \cdot 10^{-10} \right);$$

$$\xi_2 = \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega \rho} \right);$$

$$F_2 = \tanh(\xi_2^2).$$

Здесь $\alpha = water, air$ — индекс, соответствующий воде или воздуху; r_{α} — объемная доля соответствующей фазы; ρ — плотность; \mathbf{U} — вектор скорости среды; t — время; μ_{eff} — эффективная вязкость среды; μ — динамическая вязкость; μ_t — турбулентная вязкость; ρ_{ref} — референсная плотность; $\rho_{ref} = \rho_{air}$; \mathbf{g} — вектор ускорения свободного падения; k — турбулентная кинетическая энергия; ω — удельная скорость диссипации; P_k — возникновение турбулентности от вязких сил; S — инвариантная мера скорости деформации; F_1, F_2 — смешивающие функции; y — расстояние до ближайшей стенки; $\beta = 0,09$, $a_1 = 5/9$, $\beta_1 = 0,075$, $\sigma_{k1} = 2$, $\sigma_{\omega 1} = 2$, $a_2 = 0,44$, $\beta_2 = 0,0828$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega 2} = 1/0,856$ — модельные коэффициенты; $\Phi_3 = F_1 \Phi_2 + (1 - F_1) \Phi_2$, где $\Phi = \alpha, \beta, \sigma_k, \sigma_{\omega}$.

При данных вычислениях пренебрегалось трехмерными краевыми эффектами, которые малы при изоляции колеса от окружающего воздуха по боковым поверхностям и при поперечных размерах гребных лопаток, намного превышающих их радиальные размеры. Поэтому рассматривались гидро-аэродинамические процессы в плоском узком слое, далеком от периферии.

Вычисления проводились с помощью программ ANSYS CFX, для уравнений переноса использовалась численная схема высокого разрешения, для шага по времени — обратный метод Эйлера второго порядка, для турбулентности — метод первого порядка. В качестве условия сходимости выбрана относительная среднеквадратичная погрешность меньше 10^{-4} . Эффективность двигателя η определялась как отношение мощности, связанной с силой от колеса F , к механической мощности на валу:

$$\eta = \frac{F v_v}{|M\omega|},$$

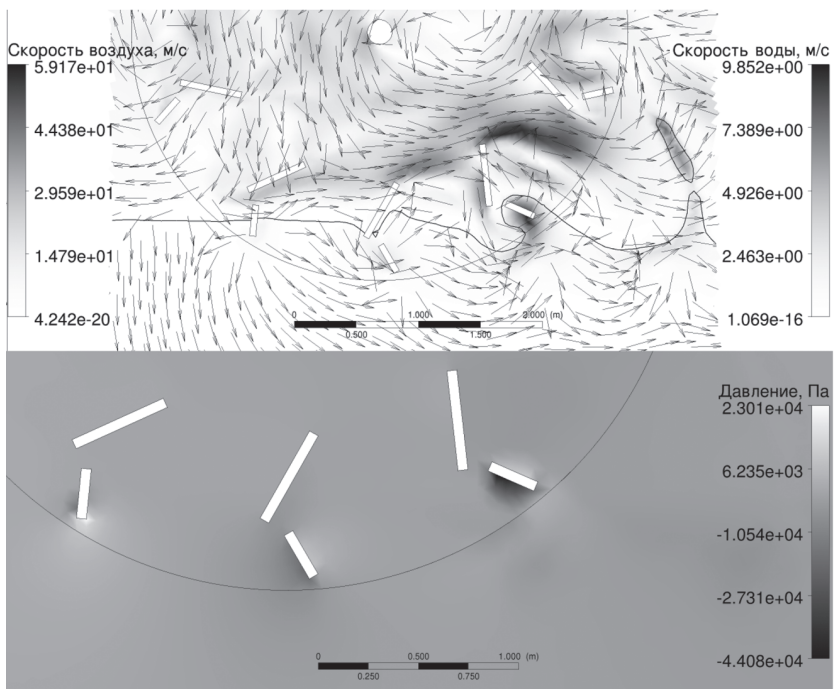
где M — вращательный момент на валу; ω — угловая скорость вращения колеса.

Сила F вычислялась как интеграл горизонтальных проекций сил давления и поверхностного трения по всей площади поверхности колеса и обтекателя. В качестве параметров воды и воздуха (при 25°C) взяты данные из библиотеки материалов ANSYS. При вычислении η проводилось усреднение по времени для периода лопаток (т.е. оборота колеса, деленного на число лопаток), чтобы сгладить выбросы, связанные с временным сдвигом между продольными импульсами и пиками момента торможения колеса.

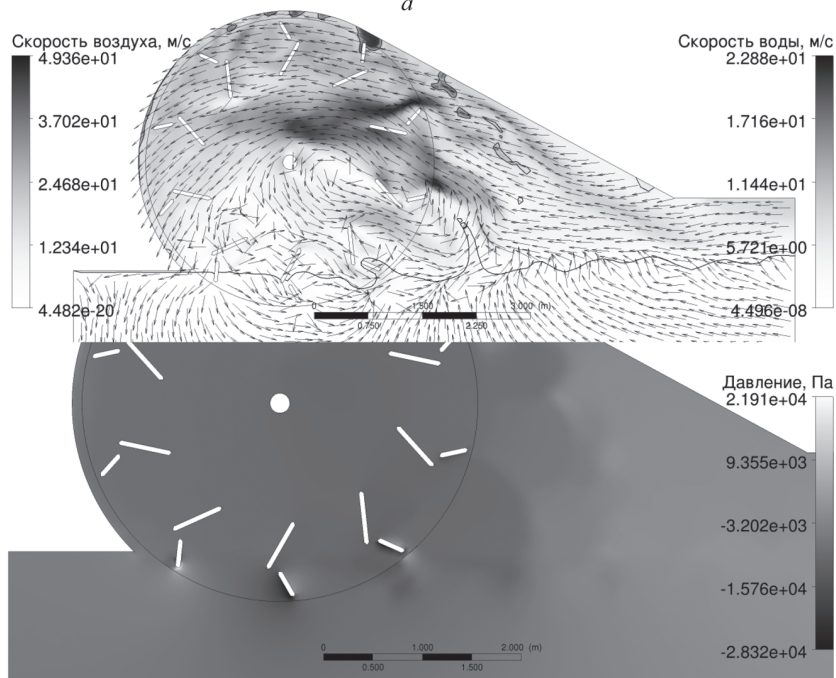
На одной стороне прямоугольной расчетной области задавались скорости воды и воздуха, равные v_v , постоянное давление воздуха и распределение давления в воде, связанное с гравитацией $p = \rho_w g(H - y)$, где H — высота уровня воды, y — вертикальная координата, g — ускорение свободного падения, ρ_w — плотность воды. На противоположной стороне задавалось свободное истечение с аналогичным распределением давления. На верхней границе задавалось свободное втекание и истечение воздуха $\nabla v = 0$, $p = p_0$, где v — скорость среды, p — давление на границе, p_0 — атмосферное давление; на нижней — непротекание $v_n = 0$, где v_n — компонент скорости, нормальный к границе. Начальные условия соответствовали мгновенному появлению движущегося и вращающегося колеса в покоящихся (в земной системе координат) воде и воздухе. Применялась подробная квазирегулярная многоблочная расчетная сетка, причем межлопаточные блоки скользили относительно периферийного блока, имеющего в плане форму прямоугольника с вырезанным кругом. Расчеты проводились до установления квазипериодического движения воды и воздуха (более оборота колеса).

На рис. 1, *a* приведено колесо с разрезными скошенными лопатками, показавшее при вычислительных экспериментах высокие характеристики по упору и эффективности при скорости судна до 45 км/ч.

Из результатов вычислений (рис. 1, *a* и рис. 2) следует, что взаимодействие с воздухом оказывает значительное тормозящее воздействие

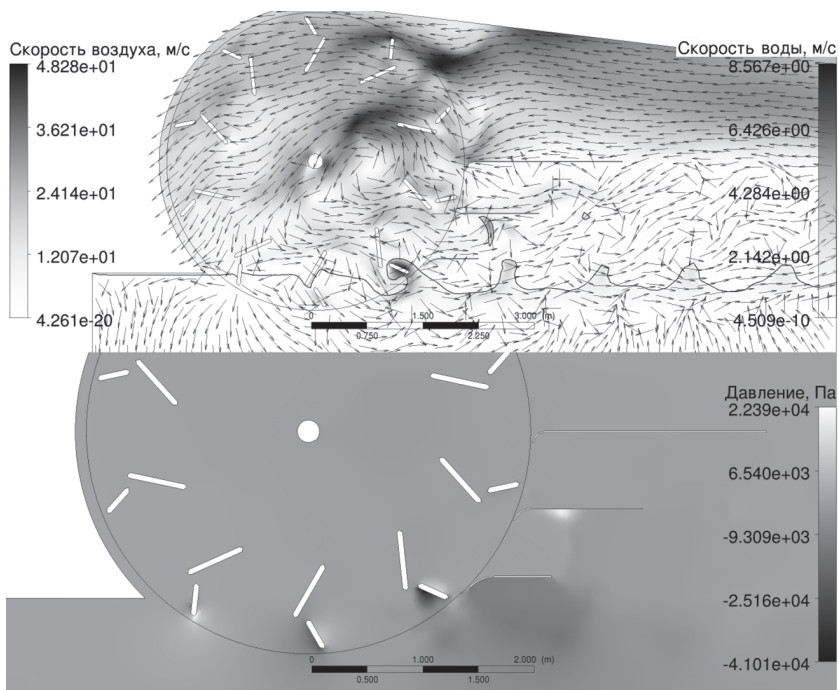


a

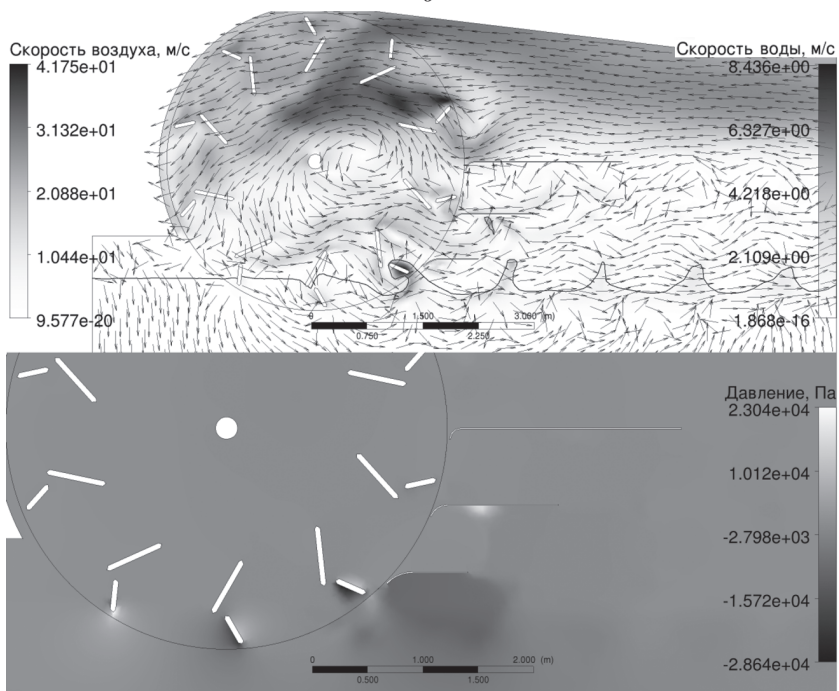


б

Рис. 1 (начало). Распределение скорости и давления для гребного колеса:
a — с разрезанными скошенными лопатками (вариант *A*); *б* — с обтекателем



б



г

Рис. 1 (окончание). Распределение скорости и давления для гребного колеса:
 б — с отбойниками; г — с открытым входом воздуха

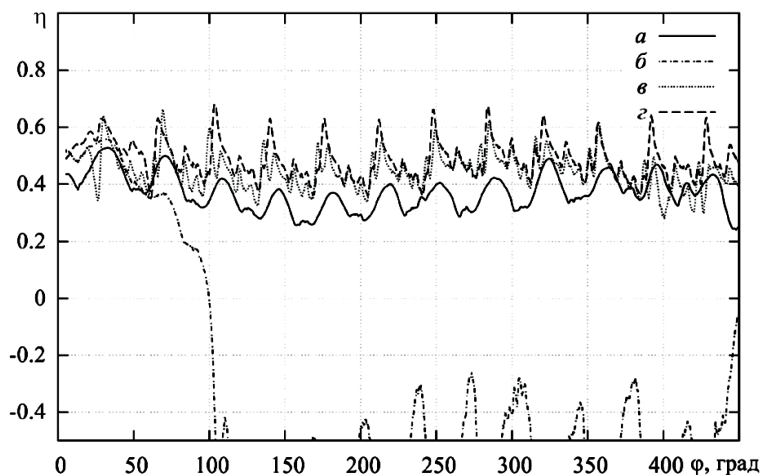


Рис. 2. Зависимость КПД колесного движителя от времени с учетом действия воздуха на скорости 45 км/ч:

a — для гребного колеса с разрезанными скошенными лопатками (вариант *A*); *б* — обтекателем (вариант *B*); *в* — отбойниками (вариант *B*); *г* — открытым входом воздуха (вариант *Г*)

как на движение судна, так и на вращение колеса — из-за плохой обтекаемости лопаток, что дает особенно большой вклад в верхней части колеса, где лопатки движутся относительно воздуха с повышенной скоростью.

Очевидное решение — закрыть колесо обтекателем (рис. 1, *б* и рис. 2).

Видно, что внутри обтекателя сформировался вихрь, результатом чего стало снижение относительной скорости лопаток и воздуха и, как следствие, снижение торможения вращательного движения колеса. Все это оказывает положительное влияние на эффективность колесного движителя.

Однако возникает новый существенный эффект, связанный с нелинейным взаимодействием воздушной и водной сред. При каждом выходе лопатки из воды формируются более-менее компактные массы воды, поднятые над средним уровнем и ускоренные назад; если при малых скоростях они успевают упасть под действием силы тяжести в пределах объема обтекателя, то в данном случае при высоких скоростях они летят, практически не замечая гравитации. В результате они перекрывают практически все выходное сечение и “выгребают” воздух из-под обтекателя, где создается значительное разрежение. Формирующийся градиент давления захватывает указанные массы воды, ускоряет их вперед, в направлении движения судна. Это значительно снижает упор и эффективность колесного движителя.

Для преодоления указанной трудности в варианте *B* предусмотрено расширение выходного сечения и установка горизонтальных отбойников, разрывающих водяные слои и создающих каналы для прохода

воздуха (рис. 1, в и рис. 2). Отбойники имеют небольшой загиб вниз, чтобы предотвратить частичное расплескивание воды вперед, наблюдавшееся при взаимодействии с плоскими отбойниками.

Но результаты вычислений (см. рис. 1, в и рис. 2) показали, что принятые меры не до конца уменьшают отрицательный эффект от взаимодействия воздушной и водной сред при встречном течении в выходном канале.

Наилучшая ситуация наблюдается при вычислительных экспериментах с конструкцией, в которой предусмотрено наличие открытого входа воздуха в нижние колеса, т.е. ограничение обтекателя снизу (рис. 1, г и рис. 2). Через указанный вход воздух поступает в нижнюю часть колеса, полностью убирая градиент давления.

Видно, что средняя эффективность такого движителя, определенная с учетом сопротивления воздуха при скорости судна 45 км/ч, достигает 46–50%. Это может сделать такие движители конкурентоспособными для широкого класса судов. Конечно, этот вывод, полученный с помощью вычислительного эксперимента, следует проверить на физических и натуральных испытаниях, но перспективы представляются многообещающими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов С.Д., Чувашев С.Н. Проектирование и комплексное математическое моделирование судна на воздушной подушке для регионов Севера, Сибири и арктического континентального шельфа // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3. С. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/640.html>
2. Алферьев М.Я. Судовые движители. М.: Мин. речного флота СССР, 1947. 662 с.
3. Логвинович Э.Г. Колесное судно // Большая Советская Энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1969.
4. ANSYS Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide // Ansys CFX Release 14 Help Syst.

REFERENCES

- [1] Popov S.D., Chuvashov S.N. Designing and complex mathematical modeling of the hovercraft for the North, Siberia Regions and the Arctic Continental Shelf. *Jelekt. nauchno-tehn. Izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation], 2013, iss. 3, p. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/640.html>
- [2] Alfer'ev M.Ya. *Sudovye dvizhiteli* [Marine propeller]. Moscow, Min. Rechnogo flota SSSR Publ., 1947. 662 p.
- [3] Logvinovich E.G. *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya: Kolesnoe sudno* [Paddle vessel. Great Soviet Encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1969.
- [4] ANSYS Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. *Ansys CFX Release 14 Help Syst.*

Статья поступила в редакцию 20.11.2014

Якимов Николай Михайлович — ассистент кафедры “Проектирование вычислительных комплексов” МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского.
МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского, Российская Федерация, 121552, Москва, Оршанская ул., д. 3.

Yakimov N.M. — Assistant Lecturer, Department of Computer Complexes Engineering, Moscow State Aviation Technological University — Russian State University of Technology named after K.E. Tsiolkovsky.
Moscow State Aviation Technological University — Russian State University of Technology named after K.E. Tsiolkovsky, Orshanskaya ul. 3, Moscow, 121552 Russian Federation.

Попов Сергей Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент НПЦ “Специальное машиностроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Popov S.D. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Special Machine Building Research and Production Center, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Чувашев Сергей Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Проектирование вычислительных комплексов” МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского.

МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского, Российская Федерация, 121552, Москва, Оршанская ул., д. 3.

Chuvashov S.N — D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Computer Complexes Engineering, Moscow State Aviation Technological University — Russian State University of Technology named after K.E. Tsiolkovsky.

Moscow State Aviation Technological University — Russian State University of Technology named after K.E. Tsiolkovsky, Orshanskaya ul. 3, Moscow, 121552 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Якимов Н.М., Попов С.Д., Чувашев С.Н. Выбор геометрии эффективного высокоскоростного судового движителя на основе гребного колеса с учетом гидроаэродинамики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 6. С. 50–58.

Please cite this article in English as:

Yakimov N.M., Popov S.D., Chuvashov S.N. Aerohydrodynamics based determination of geometry of a high-speed ship rowing wheel unit. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 6, pp. 50–58.