

СИБИРСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИЗВЕСТИЯ

Siberian Electronic Mathematical Reports

http://semr.math.nsc.ru ISSN 1813-3304

Том 21, № 2, стр. 621-644 (2024) https://doi.org/10.33048/semi.2024.21.043 УДК 519.6 MSC 76D05

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛЬНОГО И ПОЛНОМАСШТАБНОГО ГРЕБНОГО ВИНТА

К.С. Плыгунова 🗅

Представлено М.А. Шишлениным

Abstract: The article examines the effect of the free surface on the hydrodynamic characteristics of the propeller by numerical simulation in Logos software package. The numerical approach is based on a three-dimensional system of Reynolds averaged Navier-Stokes equations, which is closed by the SST Menter turbulence model together with the laminar-turbulent transition model γ – Re $_{\theta}$. The Volume of Fluid method is used to account for the free surface. A rotating propeller is simulated by a moving computational mesh and flow interpolation through a mesh interface. The method validation results are given, they were obtained on the problem of finding the open water performance of model-scale propeller KP505. The results of numerical simulation of a model and full-scale operating propeller with different depth of immersion

Plygunova K., Numerical study of the effect of the free surface on the hydrodynamic characteristics of the model and full-scale marine propeller. (\widehat{C}) 2024 Плыгунова K.C..

Результаты получены при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2024-0001 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания течений жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования индустриальных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах экса- и зеттапроизводительности»).

Поступила 22 апреля 2024 г., опубликована 10 сентября 2024 г.

К.С. ПЛЫГУНОВА

are presented. It has been shown that the small immersion depth of the propeller most strongly affects the propeller performance at the small advance coefficient due to the occurrence of aeration. The obtained thrust and efficiency of the full-scale propeller are higher than the model coefficients, which is also observed for propellers operating under open water conditions without a free surface.

Keywords: CFD, Navier-Stokes equations, Volume of Fluid, marine propeller, open water test, scale effect, Logos software package.

1 Введение

Для оценки и прогнозирования ходовых качеств судна наряду с определением сопротивления корпуса важное значение имеет точное определение гидродинамических характеристик его движителей. Несмотря на их большое разнообразие, наиболее эффективным и распространённым устройством является гребной винт. Он состоит из ступицы и лопастей, являющихся его рабочими элементами, и располагается на валу, который приводится в движение судовым двигателем. В процессе работы гребной винт диаметра D с частотой n вращается вокруг своей оси и с поступательной скоростью v_a перемещается вдоль неё. За счет разницы давлений на засасывающей поверхности лопасти, обращенной в сторону движения, и нагнетающей, воспринимающей реакцию отброшенных масс воды, создаются упор гребного винта T и момент Q [1].

На рисунке 1 показана постановка задачи обтекания гребного винта.



РИС. 1. Постановка задачи обтекания гребного винта [1]

Путь, проходимый гребным винтом в осевом направлении за один оборот, называется поступью [1]:

$$h_a = v_a/n. \tag{1}$$

Перейдя к безразмерной величине, запишем относительную поступь в следующем виде:

$$J = \frac{h_a}{D} = \frac{v_a}{nD}.$$
(2)

Относительная поступь *J* – важнейшая кинематическая характеристика, определяющая режим работы гребного винта.

Основными гидродинамическими характеристиками гребного винта является коэффициент упора K_T , коэффициент момента K_Q и коэффициент полезного действия η , которые рассчитываются согласно следующим формулам:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}, \eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q},$$
 (3)

где ρ – плотность среды.

Зависимости этих характеристик от относительной поступи называются кривые действия гребного винта, их общий вид показан на рисунке 2.



Рис. 2. Кривые действия гребного винта [1]

Из-за значительных габаритов гребных винтов проведение натурных испытаний в лабораторных условиях практически невозможно, поэтому экспериментальное исследование их работы осуществляется на уменьшенных моделях с использованием опытовых бассейнов, гидролотков и кавитационных труб. Полученные на моделях результаты затем экстраполируются на полномасштабные объекты с помощью различных методик пересчета. К стандартным испытаниям гребного винта относят тесты в так называемых условиях свободной воды, в которых изолированная модель работает в безграничной жидкости, и самоходные испытания, в которых гребной винт работает за корпусом судна [1, 2].

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованиям работы движителей в различных условиях, в том числе и с помощью вычислительной гидродинамики, некоторые вопросы, касающиеся влияния эксплуатационных факторов на гидродинамические характеристики гребного винта, до сих пор остаются открытыми. Ряд таких

К.С. ПЛЫГУНОВА

вопросов содержится в отчете 29-ой Международной конференции опытовых бассейнов (International Towing Tank Conference – ITTC) [3]. Одна из проблем, на которую исследователям рекомендуется обратить внимание, связана с работой гребного винта в условиях волнения, вызывающих качку судна. При качке судна может возникнуть ситуация, когда его движитель оказывается в условиях малого или даже неполного погружения. Близость свободной поверхности приводит к дополнительным затратам энергии на волнообразование, что снижает упор винта. Кроме того, при достаточно большой нагрузке может наступить явление аэрации – разновидности кавитации, при которой кавитационные полости на лопастях в момент нахождения последних в воде образованы захваченным с поверхности воздухом, и давление в них равно атмосферному, при этом наблюдается свойственное кавитирующему винту дополнительное снижение его пропульсивных качеств [4].

Влияние свободной поверхности на работу гребного винта в свободной воде с помощью численного моделирования рассматривается в работах [5, 6, 7]. В [5] исследовалась чувствительность гидродинамических характеристик гребного винта к близости свободной поверхности, полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными, в [6] оценивалось влияние волнения водной поверхности, в [7] исследовались волновая картина свободной поверхности, структура обтекания, а также гидродинамические характеристики гребных винтов в двух масштабах. Следует отметить, что во всех этих работах математическая модель не учитывает ламинарно-турбулентный переход, что важно при обтекании гребных винтов модельных размеров [8, 9].

Другим актуальным вопросом в корабельной гидродинамике является оценка масштабного эффекта, то есть, сопоставительные расчеты для модельного эксперимента и натурных условий. Влияние масштабного эффекта на кривые действия гребного винта в свободной воде исследовалось в [10, 11]. В [7] проводилось численное моделирование работы вблизи свободной поверхности гребных винтов разных модельных масштабов, однако натурный размер гребного винта не рассматривался.

Настоящая статья посвящена исследованию влияния близости свободной поверхности на работу гребного винта модельного и натурного масштабов в условиях свободной воды. Используемая методика численного моделирования [12] основана на решении системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, которая замыкается моделью турбулентности SST Ментера [13] совместно с моделью ламинарнотурбулентного перехода $\gamma - \text{Re}_{\theta}$ [14]. Для моделирования свободной поверхности используется метод Volume of Fluid [15]. Учет вращения гребного винта осуществляется при помощи движения узлов расчетной сетки и GGI-подобного метода для согласования решения на смежных границах произвольных неструктурированных сеток двух областей [16]. Методика реализована на базе российского пакета программ «Логос» [17, 18, 19], предназначенного для моделирования сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ. Валидация методики численного моделирования выполняется на задаче определения кривых действия международной тестовой модели гребного винта КР505 в свободной воде. Проводятся расчеты коэффициентов упора, момента и полезного действия гребного винта КР505 модельного и полномасштабного размеров при разной глубине погружения.

2 Методика численного моделирования работы гребного винта

Обтекание гребного винта потоком вязкой жидкости можно описать нестационарной трехмерной системой уравнений Навье-Стокса в изотермическом виде. Данная система состоит из уравнения сохранения массы и уравнения сохранения импульса и в консервативной форме, в декартовых координатах имеет следующий вид [20]:

$$\begin{pmatrix}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \\
\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i,
\end{cases}$$
(4)

где t – время; i, j – нижние индексы, указывающие на принадлежность векторных компонент к декартовым координатам, $i, j = x, y, z; u_i$ – компонента вектора скорости; x_i – компонента вектора декартовых координат; τ_{ij} – тензор вязких напряжений; g_i – компонента вектора ускорения свободного падения; p – давление.

Компоненты тензора вязких напряжений определяются с помощью реологического закона Ньютона [20]:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \tag{5}$$

где μ – динамическая вязкость, δ_{ij} – символ Кронекера.

При эксплуатации гребного винта среда, в которой он работает, может характеризоваться наличием двух фаз. Так, например, в кавитационных условиях присутствует паровая и жидкая фазы, при работе винта вблизи водной поверхности – вода и воздух. Возникающий межфазный раздел при этом называют свободной поверхностью. Наличие свободной поверхности усложняет рассматриваемую математическую модель. Для моделирования течения со свободной поверхностью одним из наиболее применимых на практике подходов является метод VOF (Volume of Fluid) [15]. В нем в качестве маркер-функции выступает объемная доля фазы, а для ее определения решается уравнение переноса. Преимуществами такого метода отслеживания границы является то, что он не имеет ограничений на интенсивность перемещения фаз и применяемые трехмерные неструктурированные сетки, что делает его распространённым в прикладных пакетах программ. Метод VOF основан на решении системы уравнений Навье-Стокса (4), которая дополняется уравнением переноса объёмной доли дисперсных фаз:

$$\begin{cases}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \\
\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i, \\
\frac{\partial \rho_{\xi} \alpha_{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho_{\xi} \alpha_{\xi}) = 0,
\end{cases}$$
(6)

где ξ – индекс, указывающий на принадлежность к отдельной фазе, α_{ξ} – объёмная доля ξ -й фазы, ρ – результирующая плотность, представляющая собой усреднённое значение плотности по всем фазам:

$$\rho = \sum_{\xi=1}^{N} \rho_{\xi} \alpha_{\xi},\tag{7}$$

где N – количество фаз.

Так как обтекание гребных винтов потоком жидкости фактически всегда происходит в турбулентном режиме, система (6) решается вместе с каким-либо методом моделирования турбулентности. В настоящее время практика моделирования турбулентных течений связана с применением RANS-методов [21], вихреразрешающих подходов LES [22], а также их гибридов [23]. В случае RANS подхода для описания турбулентного движения вязкой жидкости и газа используются уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (знаки осреднения опускаются) [20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau^t{}_{ij}) + \rho g_i, \\ \frac{\partial \rho_{\xi} \alpha_{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho_{\xi} \alpha_{\xi}) = 0, \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

где τ^{t}_{ij} – тензор рейнольдсовых напряжений.

Линейные дифференциальные модели турбулентности используют эмпирические соотношения для коэффициента турбулентной вязкости μ_t и гипотезу Буссинеска для вычисления тензора рейнольдсовых напряжений:

$$\tau^{t}{}_{ij} = 2\mu_t \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{9}$$

где k – кинетическая энергия турбулентности.

Система уравнений (8) замыкается моделью турбулентности $k-\omega$ SST Ментера [13] совместно с моделью ламинарно-турбулентного перехода $\gamma - \operatorname{Re}_{\theta}$ [14].

Важность учета эффектов поверхностного натяжения определяется исходя из значения числа Вебера, которое характеризует отношение инерционных сил жидкости к силам поверхностного натяжения:

$$We = \sqrt{\frac{\rho n^2 D^3}{\sigma}} \tag{10}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения. Для рассматриваемых в статье случаев We > 200, поэтому эффектами поверхностного натяжения можно пренебречь [24, 25].

Вращение тела моделируется с помощью метода явного вращения, которое обеспечивается движением расчетной сетки вместе с границами винта. При таком подходе выделяется область вблизи гребного винта, в которой осуществляется вращение, в то время как остальная область остается неподвижной. Для учёта движения сетки в системе (8) используется соотношение [26]:

$$\frac{d^*\varphi}{dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + v_i \frac{\partial\varphi}{\partial x_i},\tag{11}$$

где $\frac{d^*\varphi}{dt}$ – субстанциональная производная переносимого скаляра φ относительно подвижной системы координат, v_i – вектор скорости перемещения сетки. С использованием (11) уравнение переноса объёмной доли можно записать следующим образом:

$$\frac{d^*\alpha_{\xi}}{dt} + (u_i - v_i)\frac{\partial\alpha_{\xi}}{\partial x_i} + \alpha_{\xi}\frac{\partial(u_i - v_i)}{\partial x_i} = -\frac{\alpha_{\xi}}{\rho_{\xi}}\left[\frac{d^*\rho_{\xi}}{dt} + (u_i - v_i)\frac{\partial\rho_{\xi}}{\partial x_i}\right], \quad (12)$$

где $\frac{d^* \alpha_{\xi}}{dt}$ – субстанциональная производная на движущейся сетке.

Уравнение сохранения импульса также формулируется относительно подвижной системы координат с учётом (11):

$$\rho \frac{d^* u_i}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i \left(u_j - v_j\right)\right) - u_i \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \left(u_j - v_j\right)\right) = = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{ij} + \tau^t_{ij}\right) + \rho g_i.$$
(13)

Уравнение сохранения массы записывается относительно скорости в подвижной системе координат в следующем виде:

$$\frac{\partial \left(u_{i}-v_{i}\right)}{\partial x_{i}}=-\sum_{\xi}\frac{\alpha_{\xi}}{\rho_{\xi}}\left[\frac{d^{*}\rho_{\xi}}{dt}+\left(u_{i}-v_{i}\right)\frac{\partial\rho_{\xi}}{\partial x_{i}}\right].$$
(14)

Таким образом, конечная система уравнений (8) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial (u_i - v_i)}{\partial x_i} = -\sum_{\xi} \frac{\alpha_{\xi}}{\rho_{\xi}} \left[\frac{d^* \rho_{\xi}}{dt} + (u_i - v_i) \frac{\partial \rho_{\xi}}{\partial x_i} \right] \\ \rho \frac{d^* u_i}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i \left(u_j - v_j \right) \right) - u_i \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \left(u_j - v_j \right) \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{ij} + \tau^t_{ij} \right) + \rho g_i \\ \frac{d^* \alpha_{\xi}}{dt} + (u_i - v_i) \frac{\partial \alpha_{\xi}}{\partial x_i} + \alpha_{\xi} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{\alpha_{\xi}}{\rho_{\xi}} \left[\frac{d^* \rho_{\xi}}{dt} + (u_i - v_i) \frac{\partial \rho_{\xi}}{\partial x_i} \right]. \end{cases}$$
(15)

Для численного решения уравнений системы (15) формируются СЛАУ в соответствии с SIMPLE-подобным алгоритмом [20, 21], в котором поля скорости и давления находятся по схеме предиктор-корректор. Для решения СЛАУ используется алгебраический многосеточный метод [27].

Описанная выше численная методика реализована на базе отечественного пакета программ «Логос» (ПП «Логос») [17, 18, 19]. Для организации счета на высокопараллельных супер-ЭВМ используется механизм распараллеливания, основанный на распределенной памяти (MPI).

3 Валидация методики численного моделирования

Для валидации методики численного моделирования рассматривается задача обтекания однородным потоком вязкой жидкости международной тестовой модели пятилопастного гребного винта KP505, разработанного Южно-Корейским научно-исследовательским институтом кораблестроения и океанической инженерии (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering). Данная задача соответствует условиям эксперимента [28], в котором модельный гребной винт с диаметром D = 0.25 м вращался с частотой n = 20 об/с и обтекался потоком воды со скоростью, определяемой по формуле:

$$v_a = J \cdot n \cdot D. \tag{16}$$

Относительная поступь гребного винта *J* изменялась в интервале 0.1 – 0.9 с шагом 0.1, соответственно, диапазон скоростей набегающего потока составлял 1÷4.5 м/с.

Геометрия модели гребного винта КР505 показана на рисунке 3.

Используются скользящие расчетные сетки, которые состоят из двух регионов – вращающегося внутреннего и неподвижного внешнего. Оба региона представляют собой цилиндры, гребной винт, зафиксированный на конце вала, расположен внутри вращающегося региона, как показано на рисунке 4.

Расчетная сетка, показанная на рисунке 5, построена со сгущениями ячеек вблизи лопастей, по ходу движения закрученного потока для численного разрешения концевых вихрей, а также в пограничном слое.

628



Рис. 3. Модель гребного винта КР505



Рис. 4. Схема расчетной области для задачи обтекания гребного винта КР505



РИС. 5. Центральное сечение сеточной модели гребного винта KP505

На входной границе задается скорость набегающего потока, на выходной границе – давление, на границах гребного винта задана стенка без проскальзывания, на боковой границе расчетной области – стенка с проскальзыванием, на границах между двумя регионами установлены внутренние интерфейсы. В расчетах были приняты следующие значения физических свойств воды: динамическая вязкость $\mu_l = 0.00114$ Па·с, плотность $\rho_l = 1000$ кг/м³.

На рисунке 6 показано поле скорости в продольном сечении расчетной области для режима с относительной поступью J=0.5. Из рисунка 6 видно характерное распределение скорости при закрутке потока.



Рис. 6. Поле скорости (режимJ=0.5)

На рисунке 7 показано сравнение кривых действия гребного винта КР505, полученных в ПП «Логос», с экспериментальными данными [29].



Рис. 7. Кривые действия гребного винта КР505

630

Как видно из рисунка 7, результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Погрешность в предсказании коэффициентов момента и упора принимает наибольшие значения на относительных поступях, близких к единице, в связи с малыми значениями упомянутых величин в этих режимах работы гребного винта. Как следствие, возрастает и погрешность при вычислении коэффициента полезного действия. Отклонения полученных значений характеристик гребного винта при значениях относительной поступи меньше 0.7 составляют менее 5%. Максимальное отклонение по КПД наблюдается при значении относительной поступи J=0.8 и составляет 1.8%.

4 Численные исследования

4.1. Исследование влияния свободной поверхности на гидродинамические характеристики модельного гребного винта. Дальнейшее исследование также проводится на модели гребного винта КР505, масштаб модели составляет 1:31.6. Для оценки влияния близости свободной поверхности на гидродинамические характеристики гребного винта рассматривается четыре варианта глубины погружения, представленные в таблице 1.

$\mathbb{N}^{\underline{0}}$	Глубина погружения h, м	Отношение h/D
1	0.30	1.2
2	0.25	1.0
3	0.20	0.8
4	0.15	0.6

ТАБЛИЦА 1. Варианты глубины погружения модельного гребного винта

На рисунке 8 показана схема расчетной области и заданные граничные условия. Гребной винт расположен на расстоянии 5D от входной границы и 12D от выходной границы, до нижней, верхней и боковых границ расчетной области расстояние составляет 3.5D.

В расчетах были приняты следующие значения физических свойств воды и воздуха: динамическая вязкость воды $\mu_l = 0.00114$ Па·с, плотность воды $\rho_l = 1000$ кг/м³, динамическая вязкость воздуха $\mu_g = 1.85 \cdot 10^{-5}$ Па·с, плотность воздуха $\rho_g = 1.2$ кг/м³.

На рисунке 9 показан общий вид расчетной сетки (случай h/D=0.6), а также её фрагменты вблизи гребного винта в продольной и поперечной плоскостях.

На рисунке 10 показана форма свободной поверхности вблизи гребного винта при глубине погружения вала h/D=0.6 в зависимости от относительной поступи. Видно, что с увеличением поступи, то есть, с нарастанием скорости набегающего на гребной винт потока, возмущение свободной поверхности снижается. В случае относительной поступи J=0.3



Рис. 8. Схема расчетной области

за гребным винтом возникает глубокая полость, его лопасти пересекают раздел фаз и оголяются, за ними возникают и расходятся волны. Для относительной поступи J=0.5 наблюдается небольшая полость за гребным винтом, оголение лопастей отсутствует, в случаях J=0.7 и J=0.9 изменение формы свободной поверхности практически отсутствует.

На рисунке 11 показаны изолинии свободной поверхности для четырех рассматриваемых случаев глубины погружения гребного винта в режиме с относительной поступью 0.3 (Y – вертикальная координата, Y=0 соответствует оси вала гребного винта). Видно, что при самой малой глубине погружения наблюдается самое интенсивное волнообразование, по мере увеличения расстояния до водораздела интенсивность волнообразование снижается.

На рисунке 12 приведены поля скорости u в продольном сечении расчетной области, черной линией обозначен раздел фаз (режим J=0.3). В первых двух случаях происходит оголение лопасти гребного винта и, соответственно, возникает аэрация, то есть, захват воздуха лопастью. При погружениях h/D=1 и h/D=1.2 лопасти не пересекают свободную поверхность, характер распределения скорости соответствует полю скорости, наблюдаемому при отсутствии свободной поверхности (см. рисунок 6).

На рисунках 13-15 представлены зависимости коэффициентов упора, момента и полезного действия от относительной поступи винта для различных расстояний от свободной поверхности до вала гребного винта.



ВЛИЯНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА ВИНТА 633

Рис. 9. Расчетная сетка, сверху вниз: общий вид, плоскость в продольном сечении, плоскость в поперечном сечении



Рис. 10. Положение свободной поверхности при различных режимах работы гребного винта в случае погружения h/D=0.6: а) J=0.3, б) J=0.5, в) J=0.7, г) J=0.9

К.С. ПЛЫГУНОВА



Рис. 11. Изолинии свободной поверхности: а) h/D=0.6, б) h/D=0.8, в) h/D=1, г) h/D=1.2



Рис. 12. Поле скорости в продольном сечении расчетной области для четырех случаев с различным расстоянием от свободной поверхности до вала гребного винта: а) h/D=0.6, б) h/D=0.8, в) h/D=1, г) h/D=1.2

Из рисунков 13 и 14 видно, что зависимости коэффициентов упора и момента для случаев h/D=1.2 и h/D=1.0 практически совпадают с зависимостями, полученными при отсутствии свободной поверхности. Однако согласно рисунку 15, влияние свободной поверхности присутствует



Рис. 13. График коэффициента упора



Рис. 14. График коэффициента момента

во всех рассматриваемых случаях, так как коэффициент полезного действия на относительных поступях, начиная с J=0.7, занижен. Наибольшее влияние глубины погружения винта наблюдается на малых относительных поступях: для случая h/D=0.6 падение упора и момента на относительной поступи гребного винта J=0.2 достигает около 30%, для случая h/D=0.8 – около 16%, для h/D=1.0 – 6%.

К.С. ПЛЫГУНОВА



Рис. 15. График коэффициента полезного действия

Для используемой в исследовании модели КР505 отсутствуют экспериментальные данные при наличии свободной поверхности, но в литературе доступны данные эксперимента для гребного винта другой конфигурации [5]. Геометрии модели из работы [5] нет в открытом доступе, поэтому провести численные расчеты с ней нет возможности. В связи с этим можно сделать лишь качественное сравнение расчетных гидродинамических характеристик модели КР505 и экспериментальных данных для модели [5]. Данное сравнение можно считать справедливым, так как рассматриваются аналогичные глубины погружения гребных винтов. На рисунках 16-17 показаны экспериментальные коэффициенты упора и момента для модельного четырехлопастного гребного винта из работы [5].

Как видно из рисунков 16 и 17, расчетные зависимости коэффициентов упора и момента гребного винта КР505 имеют схожий характер, что и экспериментальные для гребного винта [5]. Для случаев h/D=0.6и h/D=0.8 в эксперименте также наблюдается падение упора и момента на малых относительных поступях, в случаях h/D=1.2 и h/D=1.5зависимости коэффициентов практически совпадают.

Что касается процесса аэрации, то авторами [5] не указывается, наблюдался ли он в эксперименте, однако в проведенном ими численном моделировании при малом погружении гребного винта оголения лопастей не происходило. В режиме J=0.1 на свободной поверхности образовывался вихрь и происходил подсос воздуха, но лопасти гребного винта не пересекали свободную поверхность. Здесь нужно отметить, что для



Рис. 16. Коэффициент упора [5]



Рис. 17. Коэффициент момента [5]

моделирования вращения гребного винта в [5] использовалась неинерциальная подвижная система координат, в которой положение винта оставалось неизменным, что не совсем корректно при наличии свободной поверхности. Кроме того, отличие может быть связано с различными геометрическими характеристиками гребных винтов (модель КР505 имеет 5 лопастей, модель [5] – 4, диаметр модели КР505 составляет 0.25 м, модели [5] – 0.179 м).

4.2. Исследование влияния свободной поверхности на гидродинамические характеристики полномасштабного гребного винта.

На следующем этапе проводится оценка влияния свободной поверхности на гидродинамические характеристики полномасштабного гребного винта KP505, диаметр которого составляет 7.9 м. Рассматривается два варианта глубины погружения гребного винта, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Варианты глубины погружения полномасштабного гребного винта

N⁰	Глубина погружения h , м	Отношение h/D
1	6.32	0.8
2	4.74	0.6

Частота вращения полномасштабного гребного винта определяется из соотношения:

$$n_f = \frac{n_m}{\sqrt{\lambda}} \tag{17}$$

где n_m – частота вращения гребного винта модельного размера, λ – мас-штаб.

Расчетная сетка для гребного винта полномасштабного размера перестроена с учетом масштаба: базовый размер ячеек увеличен в λ раз, толщина первой ячейки призматического слоя – в $\sqrt{\lambda}$ раз для сохранение малого значения безразмерного расстояния до стенки y^+ для пристеночных ячеек.

На рисунке 18 показаны поля обезразмеренной скорости $u^* = u/v_a$ в центральном сечении расчетной области для модельного и полномасштабного гребного винта (режим J=0.2, случай h/D=0.6). Черной линией показано положение свободой поверхности. Характер распределения обезразмерненной скорости в обоих случаях схож, также похожа форма возникающих за гребным винтом волн. Однако в случае модельного масштаба уровень свободной поверхности проходит ниже, и наблюдается большее оголение лопасти гребного винта по сравнению с полным масштабом.

На рисунке 19 представлено распределение коэффициента трения $(C_f = \tau_w/0.5\rho(\pi nD)^2$, где τ_w – касательные напряжения на стенке) на засасывающей и нагнетающей поверхностях лопасти гребного винта двух масштабов для случая погружения h/D=0.6, режим J=0.2. Черной линией показано положение свободной поверхности. Видно, что в модельном масштабе коэффициент трения выше, чем у полномасштабного гребного винта. В обоих масштабах значения коэффициента трения наименьшие у корня лопасти гребного винта, наибольшие – на передней кромке. На краях лопастей, выходящих из воды, наблюдается его снижение. Неоднородности в распределении коэффициента трения на винте модельного масштаба связано с зонами ламинарно-турбулентного перехода.

638



ВЛИЯНИЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА ВИНТА 639

Рис. 18. Распределение обезразмеренной скорости в центральном сечении расчетной области: слева – модельный гребной винт, справа – полномасштабный гребной винт



Рис. 19. Распределение коэффициента трения: слева – модельный гребной винт, справа – полномасштабный гребной винт, сверху – засасывающая поверхность лопасти, снизу – нагнетающая поверхность лопасти

На рисунках 20-22 представлены зависимости гидродинамических характеристик гребного винта модельного и полномасштабного размеров, а также коэффициенты полномасштабного гребного винта при отсутствии свободной поверхности, полученные с помощью метода экстраполяции Международной Конференции Опытовых Бассейнов (ITTC) [30], принятого в качестве международного стандарта.

Согласно экстраполяции ITTC, коэффициенты упора и полезного действия полномасштабного гребного винта, работающего в условиях свободной воды без водораздела, выше, чем у модели, а коэффициенты

К.С. ПЛЫГУНОВА



 ^{-×-} без свободной поверхности (модель), -⊕- h/D=0.6 (модель), -☆- h/D=0.8 (модель),
 -*- ITTC, -=- h/D=0.6 (полный масштаб), -★- h/D=0.8 (полный масштаб)





--×- без свободной поверхности (модель), -□- h/D=0.6 (модель), -□- h/D=0.8 (модель),
 --×- ITTC, ---- h/D=0.6 (полный масштаб), ----- h/D=0.8 (полный масштаб)

Рис. 21. Коэффициент момента модельного и полномасштабного гребного винта

момента – ниже. В проведенных численных расчетах получена такая же тенденция для коэффициента упора и КПД, значения коэффициента момента полномасштабного гребного винта на малых относительных



-х-без свободной поверхности (модель), -Ф- h/D=0.6 (модель), -Ф- h/D=0.8 (модель), -М- ITTC, -■- h/D=0.6 (полный масштаб), -▲- h/D=0.8 (полный масштаб)



поступях, где велико влияние свободной поверхности, выше, чем у модельного, на относительных поступях, начиная с J=0.7 – ниже. Также необходимо отметить, что зависимость КПД, полученная по методике ITTC для полноразмерного гребного винта, лежит выше зависимости для модели, но ниже расчетной, что особенно заметно на более высоких относительных поступях. Это может быть связано с тем, что в методике ITTC применяются поправки на шероховатость, а в настоящем исследовании рассматривался гладкий гребной винт.

5 Заключение

В настоящей статье были представлены результаты численного исследования влияния свободной поверхности на гидродинамические характеристики гребного винта, выполненного в пакете программ «Логос». Для валидации методики численного моделирования использовалась задача обтекания международной тестовой модели гребного винта КР505 в условиях свободной воды. Были проведены расчеты коэффициентов упора, момента и полезного действия гребного винта КР505 модельного и полномасштабного размеров при разной глубине погружения. Результаты численного моделирования показали, что малая глубина погружения вала гребного винта сильнее всего влияет на его гидродинамические характеристики на начальных относительных поступях (снижение упора и момента в случае h/D=0.6 на поступи J=0.2 достигает около 30%, по мере увеличения относительной поступи это влияние снижается. При малом погружении гребного винта возникает аэрация, причем для

К.С. ПЛЫГУНОВА

гребного винта модельного размера наблюдается большее оголение лопастей. Показано, что коэффициенты упора и полезного действия полномасштабного гребного винта размера выше, чем коэффициенты модели, что наблюдается и для гребных винтов, работающих в условиях свободной воды при отсутствии водораздела. Значения коэффициента момента полномасштабного гребного винта на малых относительных поступях, где велико влияние свободной поверхности, выше, чем у модельного, на относительных поступях, начиная с J=0.7 – ниже.

Полученные в настоящей работе результаты для испытаний гребных винтов в свободной воде являются заделом для дальнейшего исследования влияния свободной поверхности на работу гребного винта за корпусом судна.

References

- J.S. Carlton, Marine propellers and propulsion, 2nd edition, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2007.
- [2] V. Bertram, Practical ship hydrodynamics, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2000.
- [3] The Resistance and Propulsion Committee: Final report and recommendations to the 29th ITTC, in Dr. Didier Frechou, ed., Proceedings of the 29th International Towing Tank Conference (June 13-18, 2021), 2021.
- [4] V.F. Bavin, V.I. Zaikov, V.G. Pavlenko, L.B. Sandler, *Ship popularity and manoeuvrability: Textbook for universities*, Transport, Moscow, 1991.
- [5] C.Y. Guo, D.G. Zhao, Y. Sun, Numerical simulation and experimental research on hydrodynamic performance of propeller with varying shaft depths, China Ocean Eng., 28 (2014), 271-282.
- [6] Q. Zhao, C. Guo, Y. Su, T. Liu, X. Meng, Study on unsteady hydrodynamic performance of propeller in waves, J. Marine Sci. Appl., 16 (2017), 305-312.
- [7] K.-J. Paik, Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface, Inter. J. Naval Architecture Ocean Eng., 9:6 (2017), 655-667.
- [8] A. Taranov, M. Lobachev, Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale, In Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanics-Seventh Polyakhov's Reading, Saint Petersburg, Russia, 2-6 February 2015, 243-246.
- [9] J. Baltazar, D. Rijpkema, J.A.C. Falcão de Campos, On the use of the γ Re_θ transition model for the prediction of the propeller performance at model-scale, in Antonio Sánchez-Caja, ed., Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors, Espoo, Finland, 12-15 June 2017, MB2.1, VTT Technical Research Center of Finland Ltd, 2017.
- [10] C.G. Grlj, N. Degiuli, A. Farkas, I. Martić, Numerical study of scale effects on open water propeller performance, J. Mar. Sci. Eng., 10:8 (2022), Article ID 10081132.
- [11] X.-Q. Dong, W. Li, C.-J. Yang, F. Noblesse, RANSE-based simulation and analysis of scale effects on open-water performance of the PPTC-II benchmark propeller, J. Ocean Eng. Sci., 3:3 (2018), 186-204.
- [12] A. Kozelkov, V. Kurulin, A. Kurkin, A. Taranov, K. Plygunova, O. Krutyakova, A. Korotkov, Numerical approach based on solving 3D Navier-Stokes equations for simulation of the marine propeller flow problems, Fluids, 8:11 (2023), Article ID 293.
- [13] F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence, heat and mass transfer 4: proceedings of the 4th

International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Begell House Inc., West Redding, 2003, 625–632.

- [14] F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki, Y.B. Suzen, P.G. Huang, S.A. Volker, Correlation-based transition model using local variables—Part 1: Model formulation, J. Turbomach., 128:3 (2006), 413-422.
- [15] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comput. Phys., 39 (1981), 201-225. Zbl 0462.76020
- [16] A. Korotkov, A. Kozelkov, Three-dimensional numerical simulations of fluid dynamics problems on grids with nonconforming interfaces, Sib. Electron Mat. Izv, 19:2 (2022), 1038-1053.
- [17] A. Kozelkov, A. Kurkin, V. Kurulin, K. Plygunova, O. Krutyakova, Validation of the LOGOS software package methods for the numerical simulation of cavitational flows, Fluids, 8 (2023), Article ID 104.
- [18] A.V. Sarazov, A.S. Kozelkov, D.Yu. Strelets, R.N. Zhuchkov, Modeling object motion on arbitrary unstructured grids using an invariant principle of computational domain topology: Key features, J. Symmetry, 15:11 (2023), Article ID 2081.
- [19] A.S. Kozelkov, N.G. Galanov, I.V. Semenov, R.N. Zhuchkov, D.Yu. Strelets, Computational investigation of the water droplet effects on shapes of ice on airfoils, J. Aerospace, 10:10 (2023), Article ID 906.
- [20] J.H. Ferziger, M. Perić, Computational methods for fluid dynamics, Springer, Berlin, 2002. Zb1 0998.76001
- [21] C. Fletcher, Computational techniques for fluid dynamics (in two books), Moscow, Mir, 1991. (Zbl 0717.76001, Springer)
- [22] K.N. Volkov, V.N. Emelyanov, Large eddy simulations in calculations of turbulent flows, Fizmatlit, Moscow, 2008.
- [23] P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.Kh. Strelets, A. Travin, A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities, Theor. Comput. Fluid Dyn., 20:3 (2006), 181–195. Zbl 1112.76370
- [24] E. Yari, H. Ghassemi, Numerical study of surface tension effect on the hydrodynamic modeling of the partially submerged propeller's blade section, J. Mechanics, 32:5 (2016), 653-664.
- [25] C. Yvin, P. Muller, K. Koushan, Numerical study of propeller ventilation, Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors, Espoo, Finland, 12-15 June 2017.
- [26] L.G. Loitsyanskii, Fluid and gas mechanics, Moscow, GITTL, 1950. (Zbl 0247.76001, Pergamon Press, 1972)
- [27] A.S. Kozelkov, V.V. Kurulin, S.V. Lashkin, R.M. Shagaliev, A.V. Yalozo, Investigation of supercomputer capabilities for the scalable numerical simulation of computational fluid dynamics problems in industrial applications, Comput. Math. Math. Phys., 56:8 (2016), 1506-1516. Zbl 1445.76003
- [28] National Maritime Research Institute (NMRI) Tokyo 2015: A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics.
- [29] A. Taranov, Determination of local and integral parameters for container cargo carrier in digital basin, Transactions of the Krylov State Research Centre, 3:389 (2019), 73-82.
- [30] ITTC Recommended Procedures and Guidelines: 1978 ITTC Performance Prediction Method, Revision 04, 2017.

Ksenia Sergeevna Plygunova

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "RUSSIAN FEDERAL NUCLEAR CENTER - ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PHYSICS" (FSUE "RFNC-VNIIEF"),

SAROV, RUSSIA,

FEDERAL STATE-FUNDED HIGHER EDUCATION INSTITUTION "NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY N.A. R.E. ALEXEYEV",

NIZHNY NOVGOROD, RUSSIA

Email address: xenia28_94@mail.ru