

УДК 629.5.035.5

О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПРИМЕРЕ ГРЕБНОГО ВИНТА

А. В. Месропян¹, Ю. А. Шабельник²

¹avm_74@mail.ru, ²yushabelnik@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12.05.2021

Аннотация. Современные тенденции развития науки и техники делают невозможным проектирование перспективных высокоэффективных схемных решений новых изделий без моделирования с использованием численных методов и специализированных программных пакетов. Облик гребного винта для судна формируется на ранних стадиях проектирования и численное моделирование позволяет выполнить обоснованный выбор геометрии для достижения требуемых гидродинамических характеристик. Данная работа связана с исследованием влияния сеточного разрешения на результаты моделирования работы гребного винта в Ansys CFX.

Ключевые слова: гребные винты; численное моделирование; характеристики гребных винтов; гидродинамические характеристики; кривые действия гребных винтов; CFD-пакеты.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие судовой техники и повышение требований к судоводным двигателям ставят такие задачи как увеличение тяги, маневренности, повышение безопасности и улучшение экологических характеристик судоводных двигателей. На сегодняшний день наиболее широко используемым типом судоводных двигателей остается гребной винт, позволяющий обеспечивать высокий КПД в широком диапазоне режимов работы. Разработка 3D-моделей, исследование гидродинамических характеристик и оптимизация геометрических параметров гребного винта являются основными этапами при проектировании высокоэффективных гребных винтов. Проектируемый гребной винт должен обеспечивать максимальный упор и минимальный крутящий момент при оптимальной скорости вращения вала винта. Эти характеристики, как правило, представляются в виде зависимостей коэффициента упора (K_T) и коэффициента момента

(K_Q) как функцию относительной поступи гребного винта (J_p). Данные кривые действия получают, как правило, путем экспериментального тестирования «на открытой воде», так называемые модельные испытания в опытовых бассейнах, однако с развитием технологий и методов вычислительной гидродинамики (CFD-методы) – численное моделирование работы гребных винтов позволяет с достаточной точностью описать характер протекания нагрузочных характеристик и заменить часть этапов экспериментальных исследований. CFD-методы позволяют не только сократить затраты на проектирование, но и значительно снизить трудоемкость процесса проектирования и объемы доводочных работ. Необходимо также отметить, что проектирование гребного винта должно выполняться с учетом внешней скоростной характеристики двигателя (как источника энергии) и геометрии корпуса судна (как источника сопротивления). Во многом от согласования режимов работы двига-

теля, двигателя и обводов, геометрии корпуса, зависит качество пропульсивной системы судна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для численного моделирования работы гребного винта используется модуль Ansys CFX, вычислительный процесс в котором основывается на использовании усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS-методы). RANS-методы могут довольно сильно зависеть от сеточного разрешения и параметров самой численной модели, таких как граничные условия, модель турбулентности [1]. Решение конкретной задачи, как правило, предполагает исследование влияния вышеперечисленных факторов на достоверность результатов.

Гребные винты различают по ряду параметров, среди которых можно выделить конструкционный материал, шаг и регулируемость шага винта, диаметр, дисковое отношение, диаметр ступицы, количество лопастей и т.д. Одним из параметров водоходного движителя, существенно влияющих на эксплуатационные характеристики судна, является количество лопастей гребного винта, которое может варьироваться от двух до восьми и зависит от типа и условий эксплуатации судна. Четырехлопастной винт за счет симметричной расстановки лопастей обладает лучшим балансом и является одним из наиболее часто используемых типов гребных винтов. К преимуществам четырехлопастных винтов можно также отнести хорошую управляемость судна на низких скоростях и плавность хода. В работе рассматривается четырехлопастной гребной винт (рис. 1), с наружным диаметром $D = 0,16$ м, шагом $H = 0,18$ м.

Для получения нагрузочной характеристики гребного винта в модуле Ansys CFX-Pre варьируется значение скорости потока на входе при постоянном значении оборотов и определяются значения относительной поступи:

$$J_p = \frac{v_p}{Dn},$$

где v_p – расчетная скорость поступательного движения ГВ; n – частота вращения ГВ; D – диаметр ГВ.

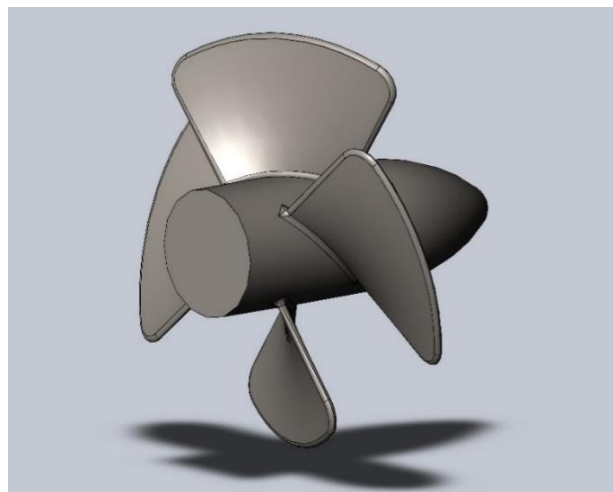


Рис. 1. Гребной винт

В качестве исходных данных для моделирования используются следующие параметры расчетной модели:

- используются стандартные атмосферные условия ($p = 101325$ Па, $T = 288,15$ К);
- плотность воды 1000 кг/м³;
- модель турбулентности k - ϵ ;
- скорость набегающего потока воды варьируется;
- моделирование границы взаимодействия гребного винта с водой задается интерфейсом Frozen Rotor;
- сеточная модель гребного винта первого варианта (рис. 2) состоит из 4 млн элементов, второй вариант – из 8 млн элементов, используется измельчение областей вокруг лопастей и втулки, а также пристеночные слои около стенок модели, необходимые для описания пристенных функций;
- сеточная модель домена свободной воды, области вокруг гребного винта, состоит из 2 млн элементов, используется измельчение элементов на поверхностях контакта с вращающимся доменом с целью избежания возникновения ошибок интерфейса (описание взаимодействия вращающегося и неподвижного доменов в Ansys CFX-Pre).

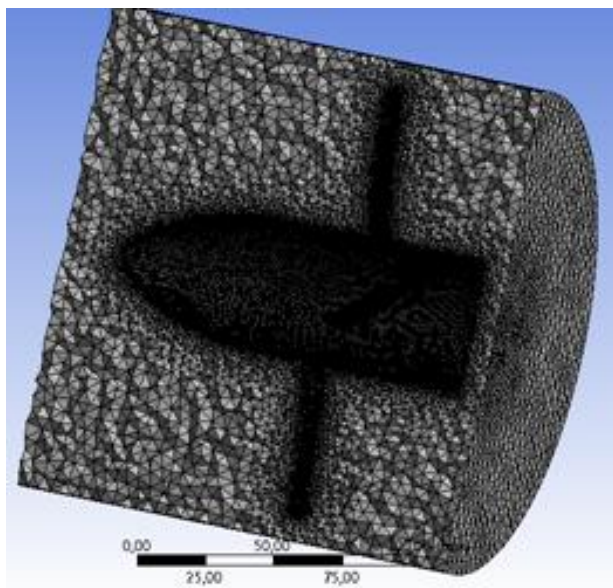


Рис. 2. Сеточная модель

На основе рекомендаций [2] границы расчетной области приняты в соответствии с рис. 3.

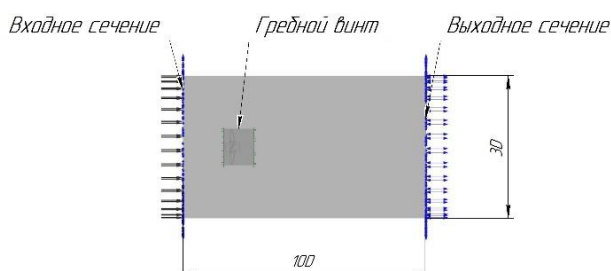


Рис. 3. Расчетная область

АНАЛИЗ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ

Важным этапом CFD-расчетов является построение сеточной модели исследуемого объекта, поскольку сетки низкого качества могут вызвать сложности с достижением сходимости решения, и, кроме того, не позволяют получить достоверные результаты расчета. Основным показателем качества сеточной модели при этом является не столько количество узлов и элементов, а показатели качества сетки, которые следует анализировать и, при необходимости, улучшать сеточную модель.

Модуль построения сетки Ansys Meshing позволяет оценить следующие критерии:

- Element Quality (качество элементов);
- Aspect Ratio (соотношение сторон);
- Jacobian Ratio (коэффициент Якобиана);

- Warping Factor (коэффициент искривления);
- Parallel Deviation (отклонение от параллельности);
- Maximum Corner Angle (максимальный угол наклона);
- Skewness (скошенность, асимметрия);
- Orthogonal Quality (ортогональное качество);
- Characteristic Length (характерная длина).

Если нет особых требований к модели, то в качестве основных показателей можно выделить:

- Orthogonal Quality (ортогональное качество).

Ортогональное качество элемента выявляет насколько близки углы между гранями смежных элементов к некоторому оптимальному углу (рис. 4).

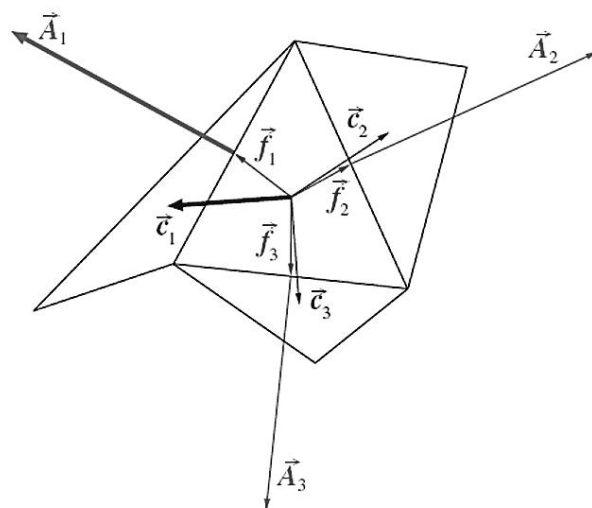


Рис. 4. Ортогональное качество (Orthogonal Quality)

Данный параметр определяется вычислением минимума для каждой поверхности:

$$\min \left(\frac{A_i \cdot f_i}{|A_i| |f_i|}, \frac{A_i \cdot c_i}{|A_i| |c_i|} \right),$$

где A_i – вектор нормали к грани; f_i – вектор от центра тяжести элемента к центру тяжести этой грани; c_i – вектор от центра тяжести элемента к центру тяжести смежного элемента.

Ортогональное качество измеряется в диапазоне $[0,1]$, приемлемыми считаются значения, превышающие значение 0,15.

– Skewness (скошенность, асимметрия).

Один из основных показателей качества сетки, определяющий насколько близки грань или элемент к идеальной форме, т.е. равносторонней или равноугольной (рис. 5).

Скошенность элемента определяется как:

$$skewness = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right],$$

где θ_{\max} – наибольший угол поверхности или элемента; θ_{\min} – наименьший угол поверхности или элемента; θ_e – угол для равносторонней грани или элемента (60° для треугольника и 90° для квадрата).

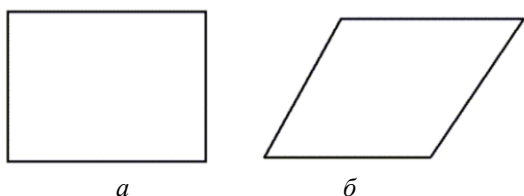


Рис. 5. Скошенность (Skewness):
a – идеальный квадрат;
б – сильно скошенный квадрат

Скошенность также может изменяться в диапазоне [0,1], где идеальным значением считается 0, приемлемыми значениями допускаются значения ниже 0,95.

– Aspect Ratio (соотношение сторон).

Показатель соотношения сторон определяется отношением длины к высоте для *граней* ($\delta x / \delta y$) и как отношение радиуса описанной окружности к вписанной для элементов (рис. 6).

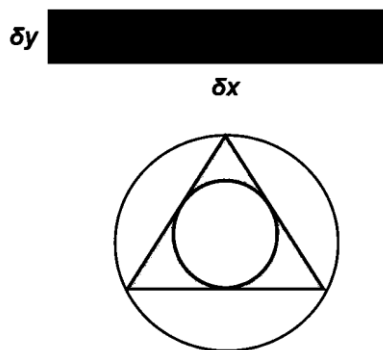


Рис. 6. Соотношение сторон (Aspect Ratio)

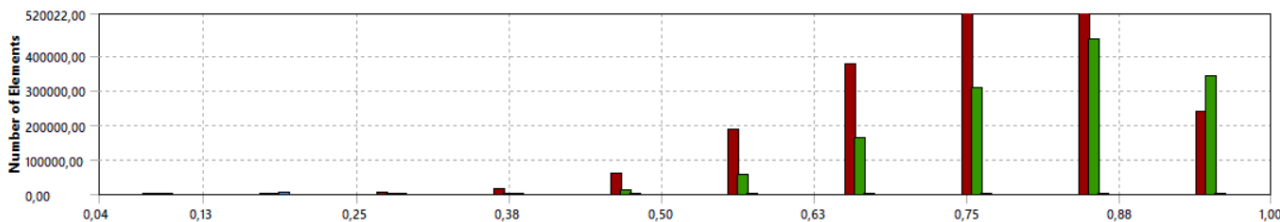


Рис. 7. Эюра «Ортогональное качество»

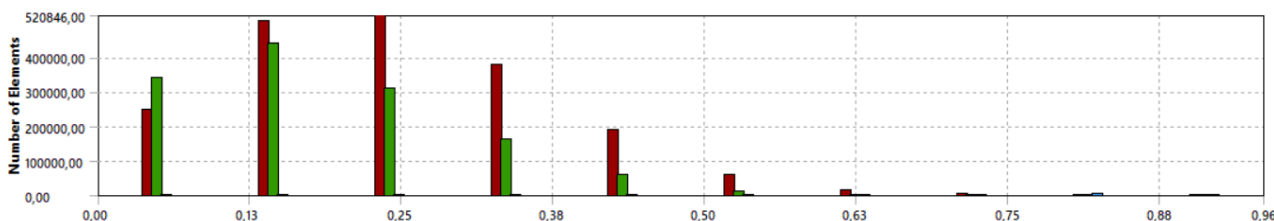


Рис. 8. Эюра «Скошенность»

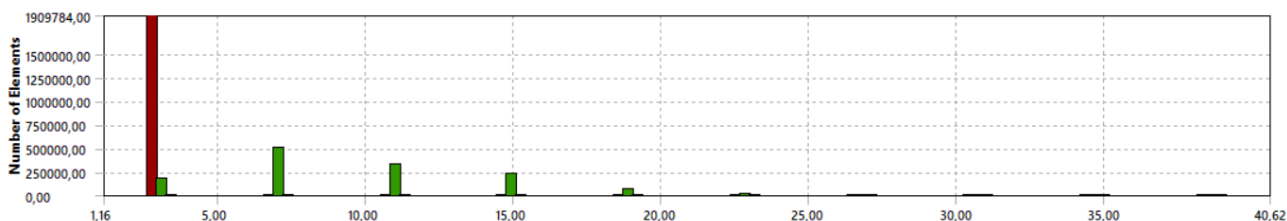


Рис. 9. Эюра «Соотношение сторон»

Идеальным отношением сторон будет 1 для равностороннего треугольника или для квадрата. Следует отметить, что, к примеру, для пограничного слоя, там где нет сильного поперечного градиента, допускаются большие значения соотношения сторон.

Значения выше приведенных основных параметров для сеточной модели первого варианта исследуемого гребного винта приведены на эпюрах 7–9.

По приведенным эпюрам можно сделать вывод о достаточно хорошем качестве сеточной модели. Второй вариант сеточной модели, с большим количеством элементов, имеет схожие эпюры параметров показателей качества сеточной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Кривые действия гребного винта показывают изменение эффективного упора, возникающего момента, в зависимости от скорости (относительной поступи).

Для расчета коэффициентов упора K_T и момента K_Q используются зависимости:

$$K_T = \frac{P}{\rho n^2 D^4},$$

$$K_Q = \frac{M}{\rho n^2 D^5},$$

где ρ – плотность воды; P – упор гребного винта; M – вращающий момент гребного винта.

В ходе проведенных расчетов, путем изменения скорости набегающего потока, варьировалось значение относительной поступи для получения ряда значений исследуемых коэффициентов.

Результаты моделирования представлены на рис. 10. Полученные расчетные точки соответствуют характеру протекания кривых действия реальных гребных винтов.

В данном случае сеточная модель построена таким образом, что количество элементов сетки уже не оказывает существенного влияния на результаты расчета, увеличивая только требуемое время расчета. Это свидетельствует о верных подходах к формированию пристеночных слоев и сеточной модели в целом.

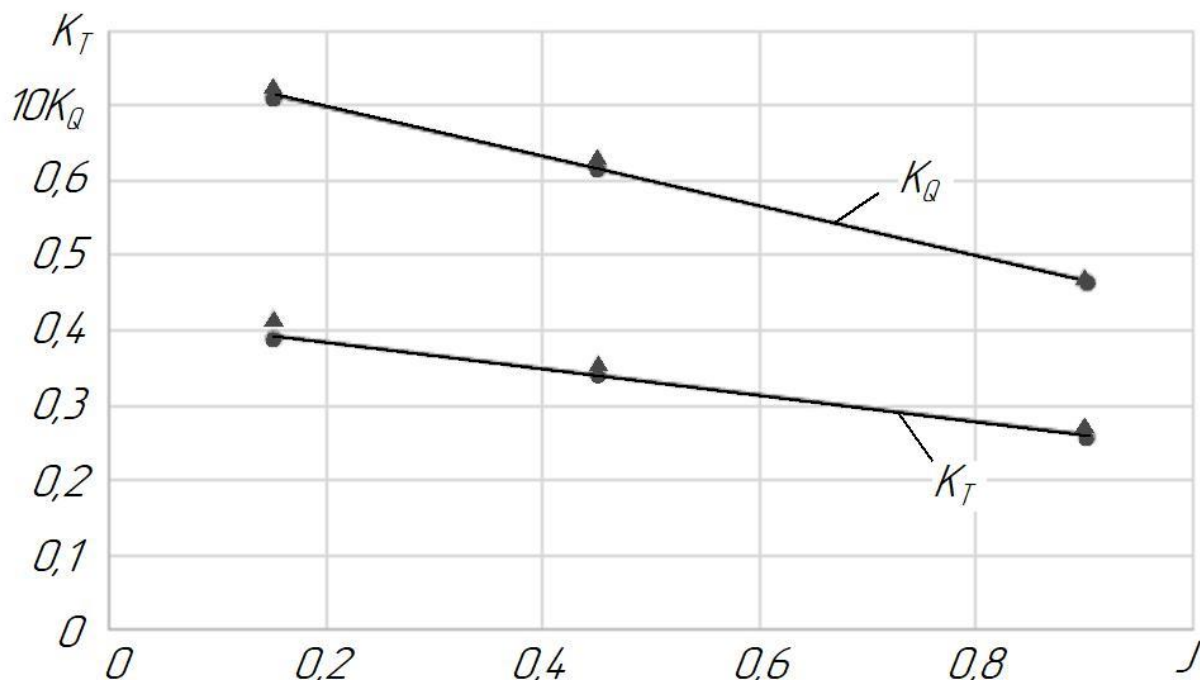


Рис. 10. Кривые действия гребного винта:
 круги – коэффициенты K_T и момента K_Q для первого варианта сетки;
 треугольники – коэффициенты K_T и момента K_Q для второго варианта сетки

Учитывая плавное протекание линии тренда, построенной на основании полученных расчетом точек, значения коэффициентов упора и момента при других интересующих значениях относительной поступи можно получить путем аппроксимации данной линии тренда.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основным путем сравнения эффективности гребных винтов остается построение кривых действия, полученных с помощью CFD-расчетов, и последующее сравнение их между собой.

Расчетный безразмерный показатель y^+ , позволяющий оценить разрешение сетки вблизи стенки и, соответственно, работу пристеночной функции, соответствует рекомендуемым значениям [3] и находится в пределах $20 \leq y^+ \leq 105$ (рис. 11).

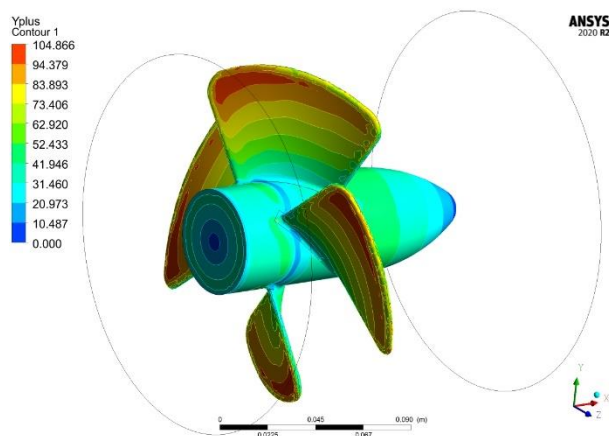


Рис. 11. Эпюра параметра y^+

Следовательно, для используемой $k-\epsilon$ модели турбулентности сеточная модель хорошо описывает пристеночные слои, однако, если проводить моделирование для других моделей турбулентности потребуются большее разрешение сеточной модели и, соответственно, большие вычислительные мощности компьютера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

CFD-расчеты на сегодняшний день неразрывно связаны с проектированием перспективной техники. Грамотное использование располагаемых вычислительных ресурсов для выявления необходимых зависимостей также является неотъемлемым шагом при проработке схемного решения

той или иной конструкции. Используя результаты проведенного моделирования, можно проводить исследования работы гребных винтов перспективных схем, определять характер протекания кривых действия и прогнозировать основные показатели. Проведение подобных исследований способствует снижению объемов и сроков доводочных работ и повышению эффективности водоходных движителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim H., Leong Z. Q. Numerical testing and verification of a marine propeller operating in a uniform flow field // *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 16, Iss. 2. Pp. 120-126. [H. Kim, Z. Q. Leong, "Numerical testing and verification of a marine propeller operating in a uniform flow field", in *Ships and Offshore Structures*, vol. 16, Iss. 2, pp. 120-126, 2020.]
2. Triet P. M., Thien P. Q., Hieu N. K. CFD simulation for the Wageningen B-Series propeller characteristics in open-water condition using k-epsilon turbulence model // *Science&Technology development journal – Engineering&Technology*. 2018. Vol. 1, Iss. 1. Pp. 35-42. [P. M. Triet, P. Q. Thien, N. K. Hieu, "CFD simulation for the Wageningen B-Series propeller characteristics in open-water condition using k-epsilon turbulence model", in *Science&Technology development journal – Engineering&Technology*, vol. 1, Iss. 1, pp. 35-42, 2018.]
3. Ansys CFX-Solver Guide. USA: Ansys Inc, 2020 R2. 386 p. [*Ansys CFX-Solver Guide*. USA: Ansys Inc, 2020.]

ОБ АВТОРАХ

МЕСРОПЯН Арсен Владимирович, зав. каф. теорет. механики. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1996). Д-р техн. наук по гидромашинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. гидроприводов систем управления ЛА и гидрофицированных систем испытаний и вскрытия нефтеносных пластов.

ШАБЕЛЬНИК Юлия Андреевна, ст. преп. каф. теорет. механики. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 2010). Готовит дис. в обл. гребных винтов.

METADATA

Title: The influence of the parameters meshes during forming calculation domain on the example of the propeller.

Authors: A. V. Mesropyan¹, Yu. A. Shabelnik²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹avm_74@mail.ru, ²yushabelnik@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 41-47, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Present trends in the development of science and technology make it impossible to design promising high-performance circuit solutions for new products without modeling using numerical methods and specialized software packages. The appearance of a propeller for a ship

is formed in the early stages of design and numerical modeling allows for an informed choice of geometry to achieve the required hydrodynamic characteristics. This work is related to the study of the influence grid resolution on the results of modeling the operation of the propeller in Ansys CFX.

Key words: propellers; numerical modeling; propeller characteristics; hydrodynamic characteristics; propeller action curves; CFD simulations.

About authors:

MESROPYAN, Arsen Vladimirovich, Head of Dept. Theoretical mechanics. Dipl. Mechanical engineer (UGATU, 1996). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2010).

SHABELNIK, Yuliya Andreevna, Senior Lecturer. Dipl. Engineer in aircraft engines design. (UGATU, 2010).