

DOI 10.15589/jnn20160205

УДК 629.5.035.5

К-67

**CALCULATION OF THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS
OF THE SCREW PROPELLER WHEN WORKING IN THE FREE WATER
IN CFD-PACKAGE FLOW VISION**

**РАСЧЁТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ РАБОТЕ В СВОБОДНОЙ ВОДЕ
В CFD-ПАКЕТЕ FLOW VISION**

Olga M. Korneliuk

olga.korneliuk@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2444-1340

О. Н. Корнелюк

препод.

*Kherson branch of NUS, Kherson**Херсонский филиал НУК, г. Херсон*

Abstract. The ways to evaluate the effectiveness of the designed propeller as one of the ways to improve the characteristics of modern ships are discussed. The efficiency of the use of CFD-modeling based on 3D-model of the propeller along with model experiments is substantiated. The aim is to study ways of raising project in CFD-Flow Vision for simulating the operation of the propeller in open water, to evaluate their effectiveness on the basis of comparison and verification of the results of numerical modeling and experiments. Methods for setting projects in CFD-package Flow Vision described. A series of experiments with different methods of setting the project are conducted. Comparison of the results of calculation of hydrodynamic characteristics of the propeller, obtained during the modeling and numerical experiments, is performed. The results obtained can be used in the design of the propeller and to assess its efficiency. The results allow to draw conclusions about the features and effectiveness of the use of a method of setting the project simulation of propeller in open water in CFD-Flow Vision package when calculating its hydrodynamic characteristics.

Keywords: CFD-package; numerical experiment; 3D-model of the propeller; model experiment; the efficiency of the propeller.

Аннотация. Описаны способы постановки проекта моделирования работы гребного винта в свободной воде в CFD-пакете Flow Vision. Выполнена оценка эффективности способов постановки проекта моделирования работы гребного винта в свободной воде в CFD-пакете Flow Vision. Выполнено сравнение результатов расчёта гидродинамических характеристик гребных винтов, полученных при проведении численных и модельных экспериментов при различных способах постановки проекта.

Ключевые слова: CFD-пакет; численный эксперимент; 3D-модель гребного винта; модельный эксперимент; эффективность гребного винта.

Анотація. Описано способи постановки проекту моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді у CFD-пакеті Flow Vision. Виконано оцінку ефективності способів постановки проекту моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді в CFD-пакеті Flow Vision. Виконано порівняння результатів розрахунку гідродинамічних характеристик гребних гвинтів, отриманих під час проведення чисельних і модельних експериментів при різних способах постановки проекту.

Ключові слова: CFD-пакет; чисельний експеримент; 3D-модель гребного гвинта; модельний експеримент; ефективність гребного гвинта.

REFERENCES

- [1] Alyamovskiy A. A. *Solid Works: kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [Solid Works: computer modeling in engineering practice]. Sankt-Peterburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 795 p.
- [2] Aksenov A. A., Shmelev V. V., Pechenyuk A. V., Stankov B. N., Pasechnik V. G. *Gidrodinamicheskii analiz sudna v programnom komplekse Flow Vision* [The ship hydrodynamic analysis in the program Flow Vision]. *Avtomatizatsiya proektirovaniya — Automation of design*, 2007, issue 3, p. 64. Available at: http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/07-3/Tesis.pdf.

- [3] Bavin V. F., Zavadovskiy N. Yu., Lemkovskiy Yu. L., Mitskevich V. G. *Grebnye vinty. Sovremennyye metody rascheta* [Screw Propellers. Modern methods of calculation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 296 p.
- [4] Kornelyuk O. N. *Osobennosti modelirovaniya raboty grebnogo vinta v srede Flow Vision* [Specific features of the simulation of propeller operation in free water in the Flow Vision environment]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific papers of NUS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2015, issue 1, pp. 21–26.
- [5] Kornelyuk O. N. *Vybor optimalnykh raschetnykh parametrov pri modelirovanii raboty grebnogo vinta v svobodnoy vode v srede Flow Vision* [Development of the methodology of the choice of optimum parameters of calculation for modelling of the screw propeller operation in free water in program Flow Vision]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific papers of NUS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2014, issue 5, pp. 17–21.
- [6] Korol Yu. M., Rudko O. N. *Issledovanie zadachi obtekaniya ploskikh konturov s nefiksirovannymi tochkami otryva pogranichnogo sloya v srede Flow Vision* [Research of a problem of a flow of flat contours with unstable points of a separation of an interface in Flow Vision]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific papers of NUS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2008, issue 4, pp. 30–35.
- [7] Korol Yu. M., Rudko O. N. *Tekhnologiya modelirovaniya raboty sudovykh vinto–rulevykh kompleksov v srede Flow Vision* [Technology of modeling of ship screw-rudder complexes work]. *Trudy vsrossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Inzhenernye sistemy — 2010»* [Proc. of the all-russian scientific-practical conference «Engineering Systems — 2010»]. Moscow, 2010, pp. 137–141.
- [8] Korol Yu. M., Rudko O. N. *Avtomatizirovannaya generatsiya dannykh dlya postroeniya tverdotelnykh modeley grebnykh vintov* [Automated generation of data to build solid models of propellers]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific papers of NUS*. Mykolaiv, NUOS Publ., 2008, issue 1, pp. 56–61.
- [9] Voytkunskiy Ya. I., Pershi R. Ya., Titov I. A. *Spravochnik po teorii korablya* [Reference book on the ship theory]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 511 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из научно-технических направлений совершенствования характеристик современных судов является разработка эффективных гребных винтов. Проектирование гребного винта в общем виде представляет собой решение двух основных задач — разработка геометрии его лопастей в соответствии с заданными характеристиками и оценка эффективности спроектированного гребного винта.

КПД гребных винтов, работающих в составе пропульсивного комплекса, даже на расчетном режиме, как правило, не превышает 60–65%. Следует учитывать также влияние корпуса судна на работу движительно-рулевого комплекса, которое так или иначе уменьшает конечное значение КПД. Поэтому повышение эффективности гребных винтов является задачей актуальной, которая к настоящему времени не получила оптимального решения.

До определённого времени эффективность гребного винта оценивалась на основании результатов модельных испытаний в опытовых бассейнах и аэродинамических трубах. Основным требованием к моделям гребных винтов является точность соответствия изготовленного профиля лопасти спроектированному. Это очень трудоёмкий процесс. Изготовление моделей гребных винтов достаточно дорогое. А ещё если необходимо внести изменения в форму лопастей модели с учётом полученных результатов испытаний, то затраты возрастают.

Последние годы характеризуются эффективным внедрением методов вычислительной гидродинамики

(CFD-пакетов) в область судостроения. Однако для получения достоверных результатов численных экспериментов необходимо правильно задать проект расчёта для решения конкретной задачи на основе рекомендаций разработчика CFD-пакета. Исследование возможностей CFD-пакета позволит сформулировать возможные способы постановки проектов моделирования работы гребного винта в свободной воде в среде Flow Vision.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На сегодняшний день существует огромное количество публикаций, посвящённых применению CFD-пакетов в области проектирования гребных винтов. CFD-пакет Flow Vision успешно конкурирует с аналогичными пакетами, такими как STAR-CD, Ansys CFX, Fluent. Опубликованы результаты многочисленных экспериментов по исследованию гидродинамики судов, работы гребных винтов в свободной воде, проведённых в среде Flow Vision как разработчиками, так и пользователями программы [2, 5, 6, 7]. Но чаще всего результаты расчётов представлены посредством цветных картинок, на которых можно увидеть распределение давления, скорости, и гораздо меньше работ, в которых представлены конкретные результаты моделирования задачи в числах.

Использование 3D-модели винта позволяет сэкономить средства, затрачиваемые на проектирование гребного винта, поскольку позволяет в дуэте с CFD-пакетом сократить или свести на нет количество проводимых модельных экспериментов.

Одной из важных задач проектировщика при моделировании работы гребного винта в свободной воде с использованием Flow Vision является задать параметры проекта так, чтобы получить достоверные результаты расчёта гидродинамики винта и оценить его КПД, т.е. его эффективность.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование способов постановки проекта в среде Flow Vision для моделирования работы гребного винта в свободной воде, а также оценка их эффективности на основе полученных результатов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Технологические возможности Flow Vision позволяют задавать различные модели движения жидкости (турбулентность), параметры метода численного моделирования, параметры расчётной сетки и др. Таким образом можно создать множество вариантов проектов для моделирования обтекания объектов в среде данного CFD-пакета программ. Однако речь идёт о том, чтобы проект моделирования работы гребного винта в свободной воде обеспечивал получение достоверных результатов расчёта. Основные этапы постановки проекта в среде Flow Vision описаны в [4].

Поэтому была поставлена задача исследовать возможные варианты задания параметров расчётного проекта в среде данного CFD-пакета с целью разработки методики постановки проекта моделирования работы гребного винта в свободной воде в Flow Vision. В результате исследований выяснилось, что проект по обтеканию гребного винта потоком жидкости может быть поставлен разными способами. Результаты расчёта серийного винта в CFD-пакете есть возможность сравнить с результатами модельного эксперимента. В случае моделирования работы несерийного гребного винта такой возможности нет. К тому же, опытным путём установлено влияние заданной модели турбулентности, размеров расчётной области (бокса), уровня адаптации расчётной сетки, модели расчёта, шага интегрирования на результаты численного эксперимента [4, 5]. Таким образом, актуальность исследования способов постановки проекта в среде Flow Vision для конкретных винтов очевидна.

3D-модель гребного винта помещается в расчётную область при помощи Фильтра подвижного тела. На входе в расчётную область задаётся скорость набегающего потока воды. Существует четыре способа постановки проекта в среде Flow Vision для расчёта гребного винта.

Способ 1. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с заданием параметров Движущегося тела. При такой постановке проекта задаются координаты расположения модели винта относительно границ расчётной области, масса винта, момент инерции, параметры вращения объекта (угловая скорость вращения, момент произвольной внешней силы, равный гидродинамическому моменту). Расчёт-

ная область может представлять собой параллелепипед, тогда задаются следующие граничные условия: Вход, Свободный выход, Стенка, Симметрия. Либо расчётная область может иметь форму удлинённого цилиндра — тогда задаются такие граничные условия как Вход, Свободный выход, Стенка. Для модели гребного винта ВЗ-35 с шаговым отношением 1,1 и диаметром 1,0 м в цилиндрическом боксе диаметром 2,5 м и длиной 7,0 м при 200000 ячейках локально измельченной сетки выполнены исследования влияния параметров моделирования на результаты расчетов. По физическому модельному эксперименту упор $T = 37520\text{Н}$, момент $M = 5592\text{Нм}$ при угловой скорости $\omega = 62,8\text{ с}^{-1}$. На рис. 1 в качестве примера изображены зависимости гидродинамического момента

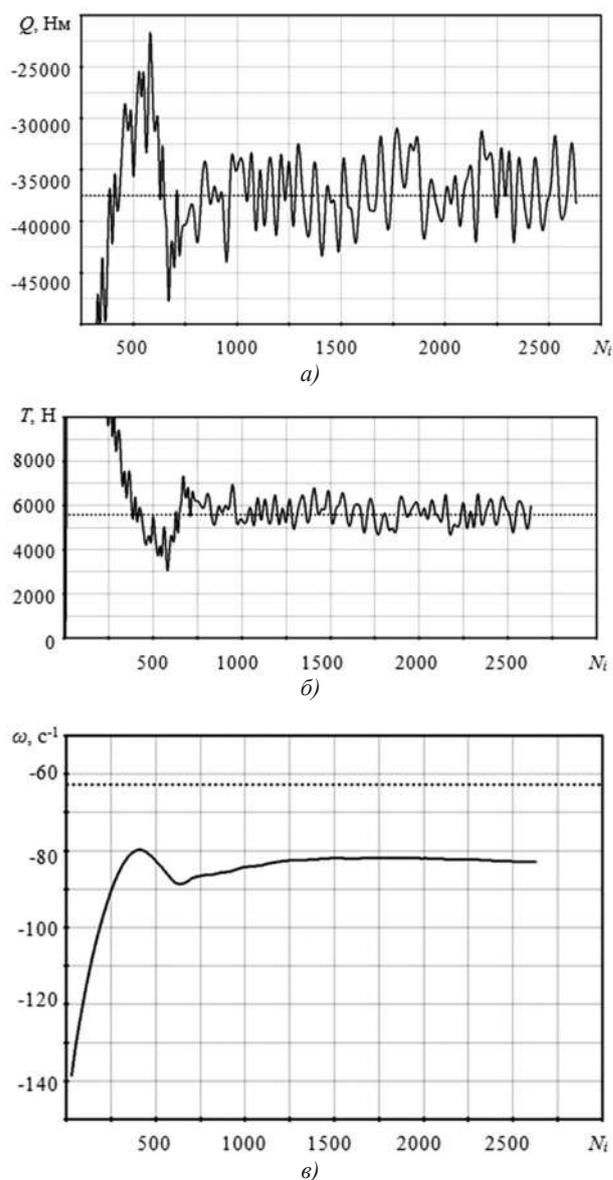


Рис. 1. Результаты численного эксперимента: а) зависимость $Q(N_i)$; б) зависимость $T(N_i)$; в) зависимость $\omega(N_i)$

Q , упора T и ω от количества итераций N_i . Пунктирными прямыми линиями изображены контрольные значения указанных величин, рассчитанные для этого винта по кривым действия этой серии — результаты модельного эксперимента, синусоидальные кривые — это результаты численного эксперимента.

В табл. 1 представлены результаты сравнения гидродинамических характеристик гребного винта, полученных при модельном и численном экспериментах.

Способ 2. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием принципа обратимости движения, когда вращение гребного винта с постоянной скоростью в воде заменяется обтеканием неподвижного винта потоком, скорость которого по значению равна, а по направлению противоположна скорости вращения гребного винта. Винт находится в состоянии покоя, а вращается Подобласть со скоростью вращения винта. При такой постановке проекта задаются координаты расположения модели винта относительно границ расчётной области, тип движения подобласти — Вращение, угловая скорость вращения, соответствующая скорости вращения винта. Результаты исследования проекта в такой постановке описаны в [3]. На рис. 2 представлена визуализация проекта расчёта гребного винта в свободной воде.

Способ 3. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием секторной

модели гребного винта. В этом случае исследуется сектор гребного винта, получаемый при сечении его плоскостями, расположенными вдоль ступицы и поперёк ступицы и пересекающимися при этом в центре ступицы гребного винта. Такой способ постановки проекта не актуальный, поскольку вблизи работающего гребного винта возникает неоднородный поток, влияющий как на другие лопасти гребного винта, так и на корпус, и на руль судна.

Способ 4. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием граничного условия Скользящая сетка. Особенность состоит в том, что при подготовке 3D-модели расчётной области в форме короткого цилиндра в соответствующем месте в ней делается вырез (рис. 2). При открытии в программе Flow Vision расчётной области гребной винт вставляют в вырез (размеры выреза должны быть максимально приближены к размерам гребного винта). В этом случае используется помимо описанных выше граничное условие Скользящая сетка. При такой постановке проекта задаётся вращение подобласти цилиндра, соответствующее угловой скорости вращения гребного винта. Таким образом, в Препроцессоре (панель задания параметров расчёта) определено две подобласти — одна в форме удлинённого цилиндра, имитирующего опытовый бассейн, вторая — в форме короткого цилиндра.

Для модели гребного винта В3-35 с шаговым отношением 0,997 и диаметром 7,9 м при 1055506

Таблица 1. Сравнение результатов модельного и численного экспериментов

T , Н (модельный эксперимент)	M , Нм (модельный эксперимент)	T , Н (Flow Vision)	M , Нм (Flow Vision)
37520	5592	36981,05	5800,9

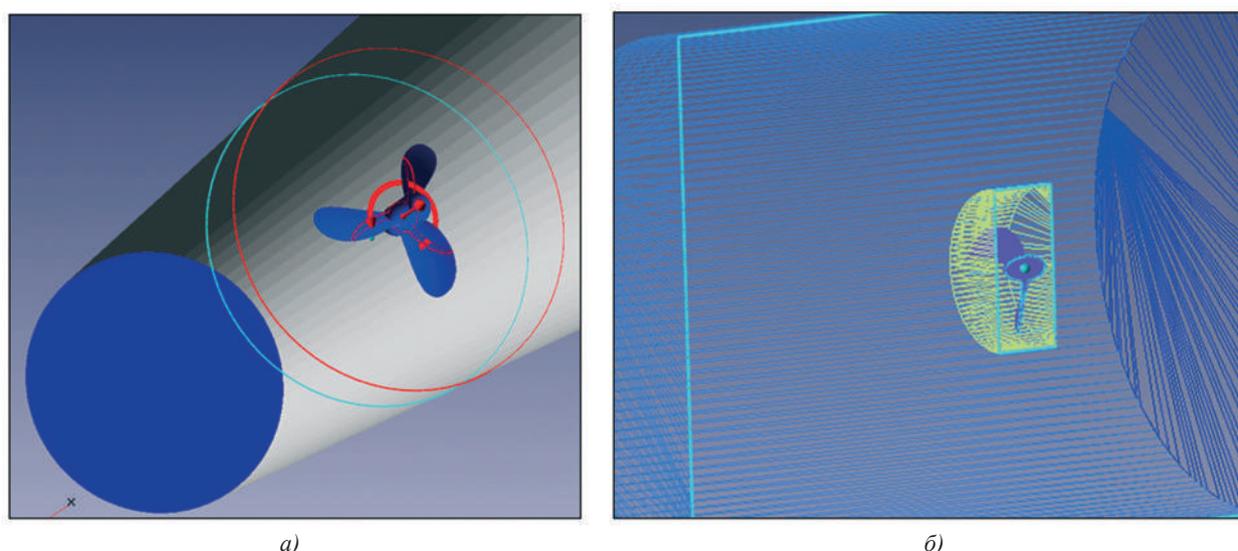


Рис. 2. Способы постановки моделирования работы гребного винта в свободной воде в среде Flow Vision: а — способ 2; б — способ 4

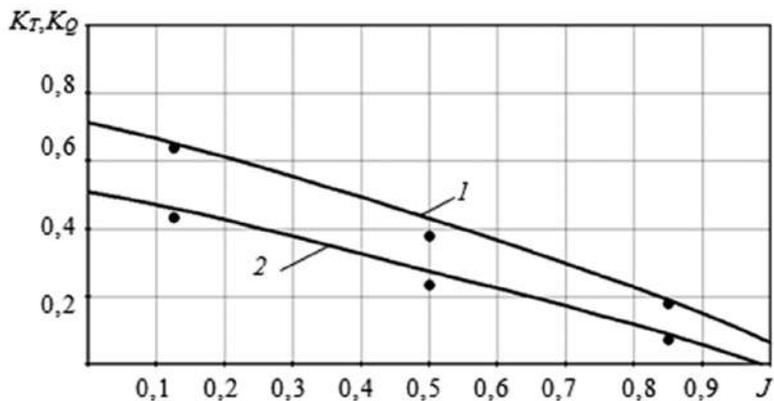


Рис. 3. Гидродинамические характеристики гребного винта:
 1 — кривая зависимости $10K_q(J)$; 2 — кривая зависимости $K_t(J)$

ячейках локально измельченной сетки выполнены исследования влияния параметров моделирования на результаты расчетов. Эксперименты проводились для трёх значений поступи J . На рис. 3 приведены результаты сравнения гидродинамических кривых, полученных в результате модельного и численного экспериментов. Сплошными линиями обозначены результаты модельного эксперимента, точками — результаты численного эксперимента.

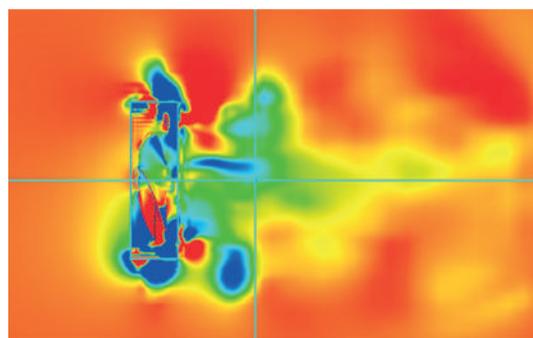
В табл. 2 представлены результаты сравнения коэффициентов упора K_t и момента K_q гребного винта, полученных при модельном и численном экспериментах.

Расчёты были проведены в CFD-пакете Flow Vision 2.05.05. На рис. 3 представлено распределение давления по поверхности нагнетающей и засасывающей поверхностей гребного винта, а также распределение давления вблизи винта при его работе в свободной воде.

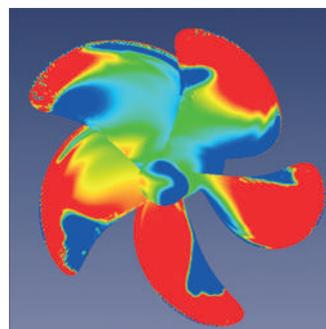
Проведённые исследования способов задания проекта во Flow Vision обоснованы и аргументированы результатами решения конкретных задач расчёта гидродинамических характеристик гребных винтов на примере винтов серии В, КР-508 с целью оценки их эффективности.

Таблица 2. Сравнение результатов численного и модельного экспериментов

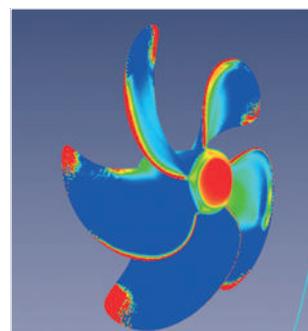
J	K_t (модельный эксперимент)	K_q (модельный эксперимент)	K_t (Flow Vision)	K_q (Flow Vision)
0,126	0,45	0,64	0,433	0,64
0,5	0,276	0,43	0,233	0,38
0,85	0,089	0,191	0,072	0,18



а)



б)



в)

Рис. 4. Визуализация распределения давления:
 а) вблизи работающего гребного винта; б), в) на поверхности гребного винта

ВЫВОДЫ. 1. В результате исследований было установлено, что во Flow Vision существует несколько способов постановки проекта для расчёта гребного винта. 2. Приведённые результаты расчётов в случае того или иного способа постановки проекта моделирования работы гребного винта в свободной воде говорят о непротиворечивости и достоверности полученных результатов. 3. Установлена и доказана необходимость разработки методики задания параме-

тров расчёта для конкретных задач, основанная на выбранном способе задания проекта, что особенно актуально в случае проектирования несерийных гребных винтов при отсутствии результатов модельных экспериментов. 4. Постановка задач в CFD-пакете для решения задач моделирования работы гребных винтов в свободной воде требует высокой квалификации пользователя, которая заключается в грамотности как компьютерной, так и гидродинамической.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Алямовский, А. А.** Solid Works: компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский. — СПб : БХВ-Петербург, 2005. — 795 с.
- [2] Гидродинамический анализ судна в программном комплексе Flow Vision [Электронный ресурс] / А. А. Аксенов, В. В. Шмелев, А. В. Печенюк, Б. Н. Станков, В. Г. Пасечник // Автоматизация проектирования. — 2007. — № 3. — Режим доступа: <http://www.remmag.ru>.
- [3] Гребные винты. Современные методы расчета [Текст] / В. Ф. Бавин, Н. Ю. Завадовский, Ю. Л. Лемковский, В. Г. Мицкевич. — Л. : Судостроение, 1983. — 296 с.
- [4] **Корнелюк, О. Н.** Особенности моделирования работы гребного винта в среде FLOW VISION [Текст] / О. Н. Корнелюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 1. — С. 21–26.
- [5] **Корнелюк, О. Н.** Выбор оптимальных расчётных параметров при моделировании работы гребного винта в свободной воде в среде Flow Vision [Текст] / О. Н. Корнелюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2014. — № 5. — С. 17–21.
- [6] **Король, Ю. М.** Исследование задачи обтекания плоских контуров с нефиксированными точками отрыва пограничного слоя в среде Flow Vision [Текст] / Ю. М. Король, О. Н. Рудько // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2008. — № 4. — С. 30–35.
- [7] **Король, Ю. М.** Технология моделирования работы судовых винто-рулевых комплексов в среде Flow Vision [Текст] / Ю. М. Король, О. Н. Рудько // Труды всерос. науч.-практ. конф. «Инженерные системы–2010». — М. : РУДН, 2010. — С. 137–141.
- [8] **Король, Ю. М.** Автоматизированная генерация данных для построения твердотельных моделей гребных винтов [Текст] / Ю. М. Король, О. Н. Рудько // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2008. — № 1. — С. 56–61.
- [9] **Войткунский, Я. И.** Справочник по теории корабля [Текст] / Я. И. Войткунский, Р. Я. Перши, И. А. Титов. — Л. : Судостроение, 1973. — 511 с.

© О. М. Корнелюк

Надійшла до редколегії 17.03.2016
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
канд. техн. наук, проф. *Ю. М. Король*