

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРЕБНОГО ВИНТА В НАСАДКЕ
В КОСОМ НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ**А. С. Бражко, ассист.;
Ю. М. Король, канд. техн. наук, проф.*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

Аннотация. Решена задача моделирования работы гребного винта в направляющей насадке в прямом и косом потоках при помощи методов вычислительной гидродинамики, реализованных в программном комплексе Flow Vision, и выполнено тестирование по экспериментальным данным Е. Мюллера. Полученные результаты могут быть использованы для решения задач позиционирования и маневрирования судов и объектов океанотехники.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, гребной винт, направляющая насадка, гидродинамические характеристики.

Анотація. Розв'язано задачу моделювання роботи гребного гвинта в направляючій насадці в прямому та косому потоках за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, реалізованих у програмному комплексі Flow Vision, та проведено тестування по експериментальних даних Е. Мюллера. Отримані результати можуть бути використані для вирішення задач позиціонування і маневрування суден та об'єктів океанотехніки.

Ключові слова: обчислювальна гідродинаміка, гребний гвинт, направляюча насадка, гідродинамічні характеристики.

Abstract. The problem of operation modeling of a propeller screw in the thrust-augmenting nozzle in straight and oblique inflows has been solved by means of the methods of computational fluid dynamics implemented in the Flow Vision software package, and testing based on the experimental data of Muller has been conducted. The received results can be used for the problem solving of positioning and maneuvering of ships and objects of ocean engineering.

Keywords: computational fluid dynamics, propeller screw, thrust-augmenting nozzle, fluid dynamic characteristics.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Неоправданно большие затраты времени и средств не позволяют продолжать экспериментальные систематические исследования свободных гребных винтов и гребных винтов в направляющих насадках современных серий при их работе в косом потоке с учетом пульсационных составляющих. Выходом из этой проблемной ситуации может служить применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) [3], которые могут заменить дорогостоящий физический эксперимент более дешевым, но не менее эффективным численным моделированием. Многие CFD пакеты, в том числе и использованный авторами программный комплекс Flow Vision, имеют потенциальную возможность такого моделирования, однако требуют создания трехмерных геометрических моделей объектов исследования, формулировки краевых задач гидродинамики, генерации сетки, выбора модели турбулентности и задания других специфических параметров моделирования. Разработке методики оптимального численного моделирования работы изолированных гребных винтов в насадке в косом потоке и посвящена настоящая статья.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ПУБЛИКАЦИЙ**

Особым случаем применения гребных винтов в насадках является использование их в качестве движительно-рулевого комплекса (ДРК), т. е. одновременно в качестве движителя и средства управления

судном. Такой комплекс устанавливается на поворотной колонке, обеспечивающей поворот комплекса в произвольное по отношению к судну положение, т. е. перекадку на угол от 0 градусов до 360.

Комплекс гребной винт–направляющая насадка обладает рядом специфических особенностей, связанных с действием насадки. Возникающая вокруг профиля насадки циркуляция скорости ускоряет развитие в струе гребного винта осевых вызванных скоростей и разгружает гребной винт, перекадывая часть упора комплекса на насадку. При работе комплекса в косом потоке насадка формирует поле скоростей перед гребным винтом, выравнивает его и делает практически соосным, сохраняя величину скорости натекания. По утверждению А.Д. Гофмана, скос натекающего потока мало влияет на величину упора гребного винта [1]. В то же время приведенный автором график зависимости упора гребного винта в насадке от угла натекания косога потока противоречит его же утверждению. По мнению авторов статьи, график описывает настоящую картину обтекания, которая говорит о том, что возрастание угла натекания от 0 до 90 градусов ведет к утяжелению гребного винта, а следовательно, к увеличению упора.

Упор комплекса в целом увеличивается еще и вследствие действия насадки как изолированного кольцевого крыла. Соппротивление насадки также увеличивается в косом потоке. Возрастание упора комплекса в косом потоке по сравнению с его значением в осевом потоке не означает роста эффектив-

ности комплекса в целом. Скос натекающего потока увеличивает упор комплекса и уменьшает его движущую силу. Поперечная сила, развиваемая комплексом винт–насадка при обтекании его косым потоком, всегда направлена в ту же сторону, что и поперечная составляющая скорости натекания, т. е. представляет собой стабилизирующую силу.

Обширное экспериментальное исследование круговых гидродинамических характеристик серии открытых гребных винтов и гребных винтов в неподвижных по отношению к винту насадках было осуществлено доктором Е. Мюллером в Дуйсбургском опытовом бассейне [4]. Измерения сил и моментов, действующих на комплекс в целом, повернутый на угол скоса по отношению к направлению движения буксировочной тележки, выполнялись в поточной системе координат. Испытания проводились в широком диапазоне изменения относительной поступи и в соответствующем для каждого гребного винта серии диапазоне изменения коэффициентов нагрузки. В качестве насадок была принята серия из трех моделей упрощенной формы. Данные, с которыми сравнивались результаты численного эксперимента, были взяты для насадок № 2. Силы на гребном винте не измерялись. Гребные винты – серии В4-55 с модифицированной формой лопасти (усечена).

А.Д. Гофман по данным Мюллера разработал достаточно удобные инженерные методики для учета скоса потока при расчетах гидродинамических характеристик комплекса винт–насадка [1]. Однако опыты Мюллера и, соответственно, методики Гофмана не позволяют определять нестационарные (пульсационные) составляющие сил и моментов на винте и насадке, знание которых необходимо для расчета и разработки мероприятий по предотвращению вибрации лопастей и корпуса судна.

Приведенные в указанной литературе результаты получены для конкретных винтов и насадок. Даже приведенные к безразмерному виду, они не могут быть со стопроцентной уверенностью применимы к другим винтам и насадкам. Кроме того, движительно-рулевые комплексы могут состоять из двух и более винтов в поворотных насадках, между ними может возникать сложное гидродинамическое взаимодействие. Поэтому количество параметров физического моделирования для таких комплексов возрастает, соответственно растут стоимость и сроки выполнения.

В связи с этим и возникла необходимость разработки методики моделирования работы гребных винтов в насадках в косом потоке с использованием программного комплекса Flow Vision.

ЦЕЛЮЮ НАСТОЯЩЕЙ СТАТЬИ является разработка методики расчета характеристик комплекса гребной винт–направляющая насадка в прямом и косом набегающем потоке с помощью программного комплекса Flow Vision.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим задачу обтекания гребного винта в насадке в косом набегающем потоке в диапазоне углов $\Theta = 0 \dots 180^\circ$. Шаг изменения угла скоса в расчетах был взят 30° .

В качестве модели выбран гребной винт, использованный доктором Е. Мюллером в Дуйсбургском опытовом бассейне, со следующими параметрами: серия Вагенингенского бассейна В4-55 с шаговым отношением $P/D = 1,0$; диаметр гребного винта $D = 200$ мм; коэффициент нагрузки гребного винта по упору при осевом натекании $\sigma_0 = 4,6$; относительная поступь $J = 0,3$. Контур лопасти модифицирован: лопасть усечена. Были исследованы изолированный комплекс винт–насадка и комплекс винт–насадка с поворотной колонкой, прикрепленной к буксировочной тележке.

Для облегчения построения на языке Fortran проф. Ю.М. Королем разработана программа GSP, которая генерирует координаты точек контуров сечений лопасти на относительных радиусах гребного винта. Трехмерные модели готовились в CAD Solid Works, пример модели представлен на рис. 1. Для удобства экспортирования твердотельные модели сохранялись в регулируемом формате *.stl.

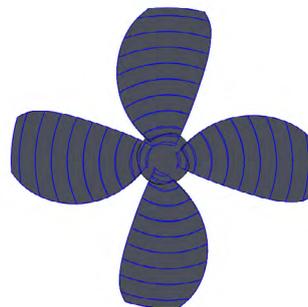


Рис. 1. Твердотельная модель гребного винта, реализованная в программном комплексе Solid Works

Цель моделирования – получить зависимость изменения результирующей силы комплекса гребной винт–насадка от угла натекания потока.

Решение задачи. Для моделирования обтекания воспользуемся программным комплексом Flow Vision и в качестве математической модели выберем модель «несжимаемая жидкость», в состав которой входят уравнения Рейнольдса

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla(\vec{v} \times \vec{v}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left[(\mu + \mu_t) \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right],$$

сплошности

$$\nabla \vec{v} = 0,$$

стандартной k - ϵ модели турбулентности [3]

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon};$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v} k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \epsilon;$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v} \epsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\epsilon^2}{k};$$

$$G = D_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}; \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \bar{v} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i};$$

$$\sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\epsilon = 1,3; \quad C_\mu = 0,09; \quad C_1 = 1,44; \quad C_2 = 1,92.$$

На рис. 2. изображены бокс, имитирующий окружающую гребной винт в насадке водную среду, рас-

ставленные граничные условия и помещенный в бокс цилиндр с винтом в насадке внутри. С целью минимизации временных затрат на выполнение расчетов исследовалось влияние на результаты моделирования размеров расчетной сетки, уровня адаптации сетки по поверхности гребного винта, насадки и шага по времени (фиксированный шаг по времени). Установлены следующие оптимальные параметры моделирования: уровень адаптации сетки по поверхности винта равен 2, по насадке – 2 и шаг по времени 0,001. При этом количество расчетных ячеек – около 80000. Для сходимости достаточно 800–2000 итераций, что занимает на компьютере с процессором Intel Celeron CPU 540 1,86 GHz, 1 Гб ОЗУ от 15 до 20 часов для одного угла скоса набегающего потока.

Характерная картина распределения давления и пульсации упора при обтекании изолированного комплекса винт–насадка показана на рис. 3.

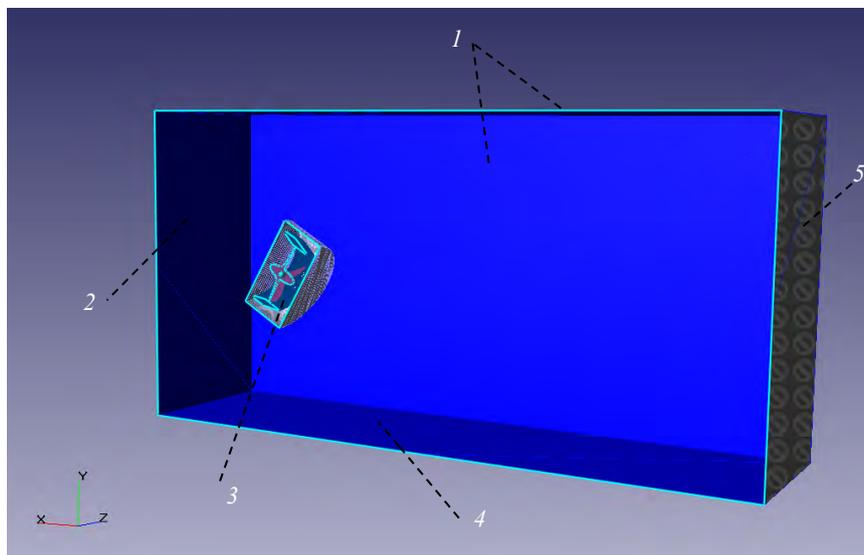


Рис. 2. Граничные условия: 1 – симметрия (верхняя и боковая грани); 2 – вход; 3 – цилиндр с винтом и насадкой; 4 – симметрия (нижняя и боковая грани); 5 – выход

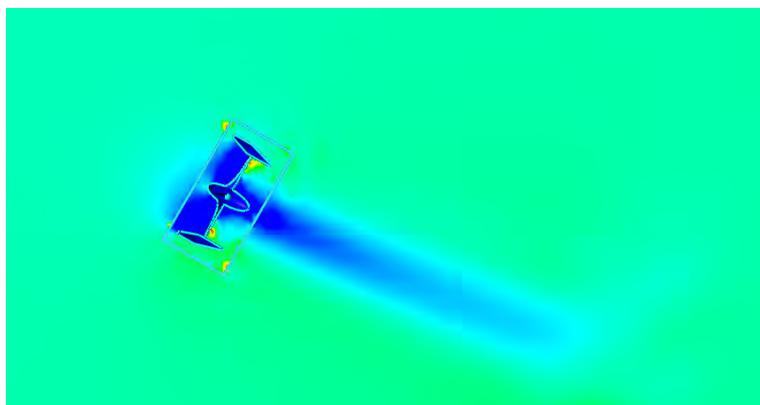


Рис. 3. Интерфейс программы Flow Vision и характерная картина распределения давления в диаметальной плоскости гребного винта при угле натекания потока 30°

Результаты моделирования в виде зависимостей упоров комплекса винт-насадка от угла натекания, изменения коэффициента результирующей силы комплекса винт-насадка от угла натекания потока (винт-насадка – изолированный комплекс и с пово-

ротной колонкой), зависимость отклонения упора от среднего значения на каждом рассчитанном угле натекания, коэффициента упора гребного винта в насадке от угла натекания косога потока представлены на рис. 4–11.

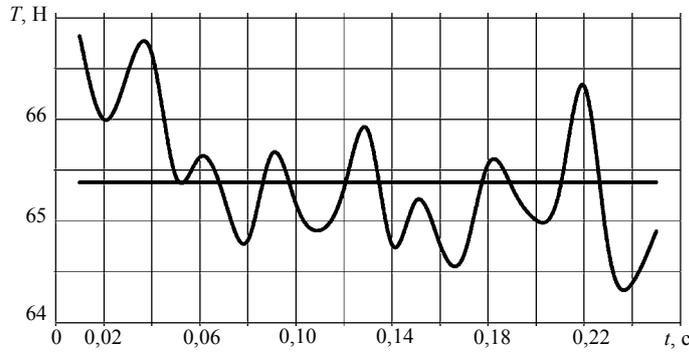


Рис. 4. Зависимость $T(t)$ при угле натекания 0°

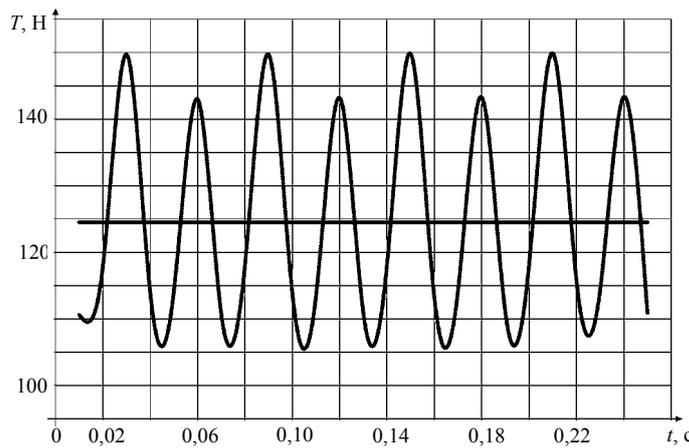


Рис. 5. Зависимость $T(t)$ при угле натекания 60°

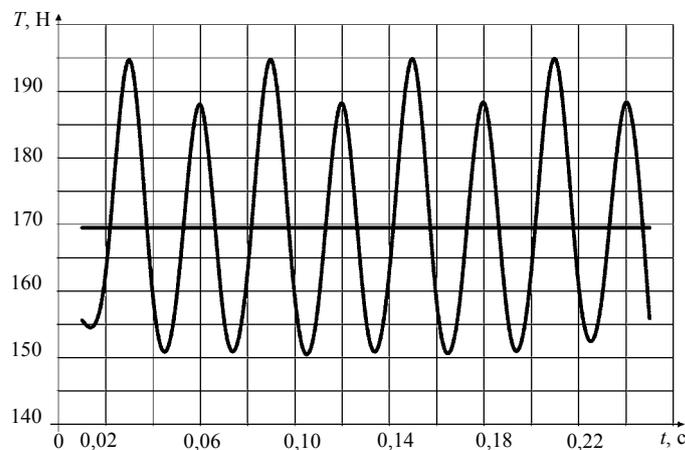


Рис. 6. Зависимость $T(t)$ при угле натекания 120°

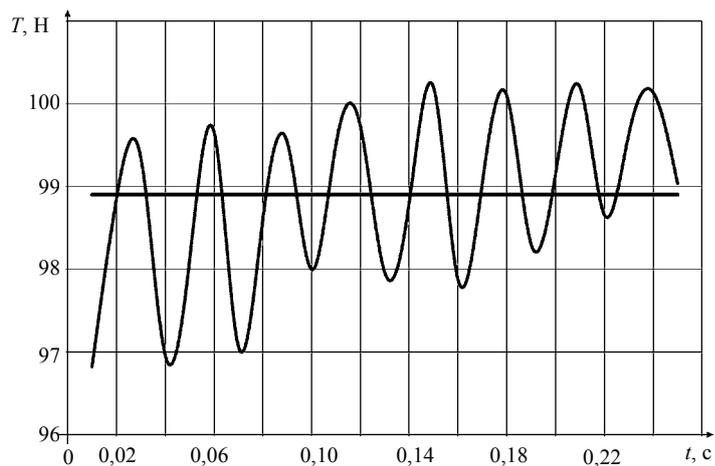


Рис. 7. Зависимость $T(t)$ при угле натекания 180°

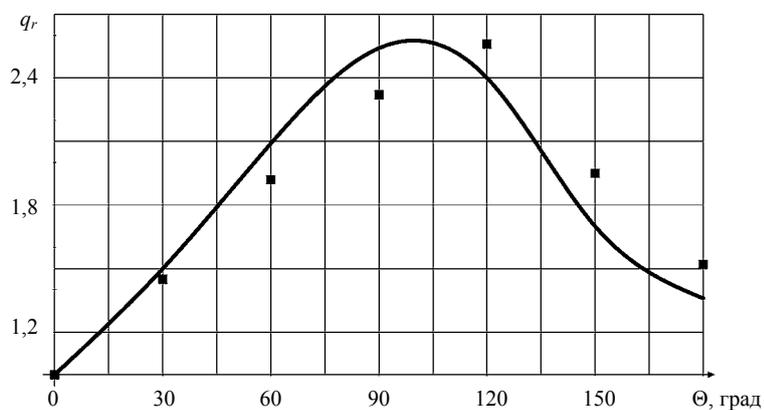


Рис. 8. Зависимость изменения коэффициента результирующей силы гребного винта от угла натекания для изолированного комплекса винт–насадка (точками обозначен численный эксперимент)

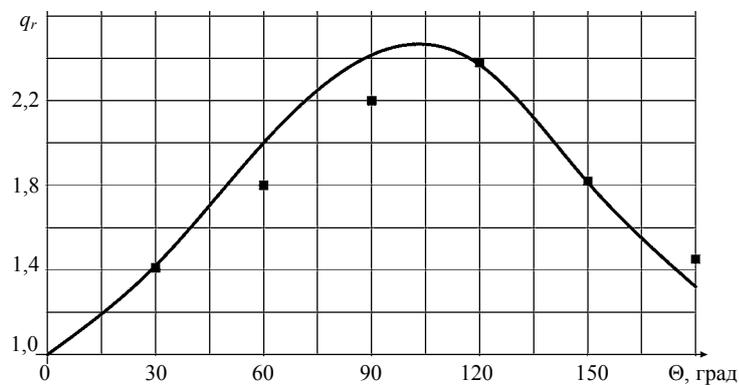


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента результирующей силы гребного винта от угла натекания для комплекса винт–насадка с поворотной колонкой, прикрепленной к тележке (точками обозначен численный эксперимент)

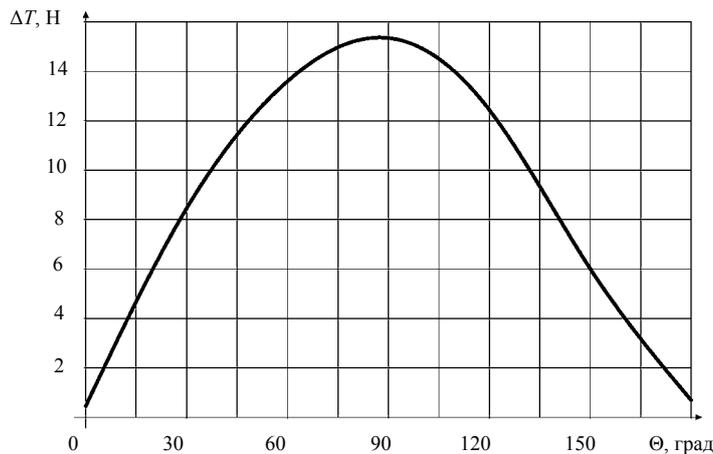


Рис. 10. Зависимость отклонения упора от среднего значения на каждом рассчитанном угле натекания

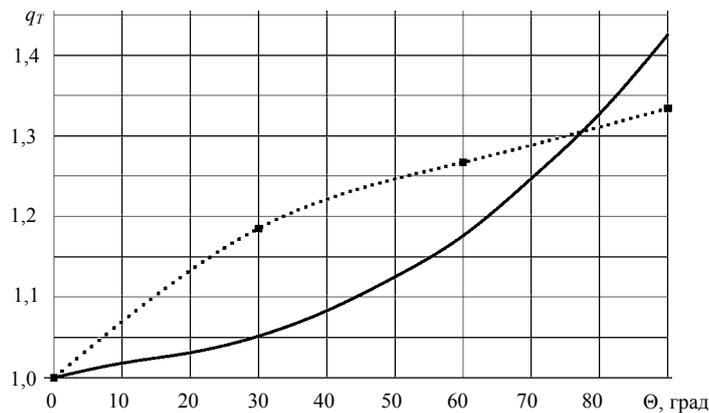


Рис. 11. Зависимость коэффициента упора гребного винта в насадке от угла натекания косого потока

ВЫВОДЫ

1. Характер зависимости изменения коэффициента результирующей силы комплекса винт–насадка от угла натекания соответствует физическому эксперименту. При всех углах натекания потока на гребной винт в направляющей насадке, даже на прямом курсе, видна пульсация упора, что соответствует действительности [2]. С увеличением угла натекания потока амплитуда пульсации упора увеличивается и наблюдается отклонение от синусоидального закона. Разработанная методика моделирования позволяет эффективно, с минимальными затратами времени и средств моделировать работу гребных винтов в насадке в косом потоке, а также получать данные о величине пульсаций сил и моментов.

2. Следует заметить, что утверждение А.Д. Гофмана о неизменности упора гребного винта в насадке

под воздействием скоса потока ошибочно, что доказано численным экспериментом [1]. При проведении физического эксперимента силы замерялись для комплекса винт–насадка в целом, что приводило к невозможности измерить силы и моменты на винте или насадке отдельно [1]. Измерения сил и моментов комплекса велись с учетом сопротивления поворотной колонки. Все эти неточности физического эксперимента не позволяют в полной мере оценить силы и моменты, возникающие на гребном винте и насадке [1].

3. Поскольку методика моделирования разработана и подтверждена данными верификации (см. рис. 8–11), можно утверждать следующее:

1) получение гидродинамических характеристик гребных винтов в насадках в косом потоке для разработки математических моделей движительно-рулевых

комплексов судов и объектов океанотехники не вызывает сомнений и трудностей;

2) при работе ДРК в косом потоке возникают периодические пульсации сил и моментов, которые также легко получаются (см. рис. 4–7);

3) разработанные методики позволяют моделировать также многокомпонентные ДРК и ДРК за корпу-

сом, что достаточно актуально для решения задач позиционирования и маневрирования судов и объектов океанотехники.

Дальнейшая работа будет направлена на разработку методики моделирования гребных винтов в неоднородном потоке за корпусом судна в программном комплексе Flow Vision.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Гофман, А. Д.** Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна [Текст] / А. Д. Гофман. – Л. : Судостроение, 1988. – 360 с.
- [2] **Миниович, И. Я.** Действие гребного винта в косом потоке [Текст] / И. Я. Миниович // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1946.– Вып. 14.
- [3] Система моделирования движения жидкости и газа Flow Vision. Руководство пользователя [Текст]. – М. : ТЕСИС, 2007. – 305 с.
- [4] **Müller, E.** Results of open Water tests witch ducted and nonducted propellers witch angle of attack from 0 to 360 deg [Text] / E. Muller // Polish Acad. Of Sci. Proc.of Symposium «Advance in propeller research and design». – Gdansk, 1981.

© Г. С. Бражко, Ю. М. Король

Надійшла до редколегії 15.01.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов