

УДК 629.5.035.015.2

А.Е. ТАРАНОВ, М.П. ЛОБАЧЕВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С УЧЕТОМ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА

Описываются результаты численного моделирования работы моделей гребных винтов в однородном потоке. Исследуется влияние использования модели ламинарно-турбулентного перехода на точность предсказания гидродинамических характеристик и масштабного эффекта.

Ключевые слова: *численные методы, ламинарно-турбулентный переход, гребные винты, масштабный эффект.*

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на достаточно хорошее согласование результатов численного моделирования и экспериментальных данных применительно к исследованию обтекания гребных винтов, доступность высокопроизводительной техники и прогресс в развитии численных методов позволяет заглянуть в этот процесс на более детальном уровне. Если для винтов натуральных размеров справедливо предположение о том, что лопасти винта целиком покрыты турбулентным пограничным слоем, то в случае исследования гребных винтов модельных размеров можно допустить наличие на лопастях винта ламинарного участка. В предлагаемой работе рассматривается численное моделирование обтекания трех гребных винтов модельных размеров (диаметром порядка 200–250 мм) различной формы и исследуется влияние учета эффекта ламинарно-турбулентного перехода на точность предсказания их гидродинамических характеристик (ГДХ). Для этого используется коммерческий продукт вычислительной гидродинамики Star-CCM+, в котором реализована одна из моделей ламинарно-турбулентного перехода, предложенная Ментером и Лэнгтри [1].

Явление ламинарно-турбулентного перехода известно в гидромеханике достаточно давно. Мы не будем останавливаться на деталях этого явления, напомним только основные виды ламинарно-турбулентного перехода. Первый тип – натуральный переход – возникает в потоке жидкости при малом (порядка долей процента) уровне внешней турбулентно-

сти. Второй – байпасный переход – встречается при уровне внешней турбулентности более 1 %. В этом случае сам переход происходит быстрее, так что некоторые стадии перехода пропускаются. Третий тип – переход, вызванный отрывом, например, при локальном изменении геометрии. Кроме этого, встречаются переход, вызванный взаимодействием с вихревым следом какого-либо объекта, расположенного выше по потоку, и так называемый обратный турбулентно-ламинарный переход. В настоящей работе нас интересуют первые три вида перехода, потому что они учтены авторами используемой в расчетах модели.

В соответствии с современными тенденциями в разработке полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности модель ламинарно-турбулентного перехода Менстера – Лэнгтри, исходно разрабатывалась с целью избежать вычислительных операций нелокального характера. Международный и межотраслевой опыт использования пакетов вычислительной гидродинамики, накопленный в последние десятилетия, показывает, что такого рода операции (например, определение интегральных параметров пограничных слоев) практически несовместимы с современными технологиями вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamic, CFD), основанными на широком использовании неструктурированных сеток и массивной параллелизации вычислений. Другое исходное положение модели Менстера – Лэнгтри заключается в концепции непосредственного использования в ходе каждого конкретного расчета эмпирических корреляционных зависимостей, которые определяют начало ламинарно-турбулентного перехода в пристенных пограничных слоях [2]. Эти два базовых положения модели Менстера – Лэнгтри значительно повышают уровень ее универсальности.

Поскольку один из разработчиков модели, Ф.Р. Менстер, является и создателем хорошо зарекомендовавшей себя и широко используемой в CFD модели турбулентности $k-\omega$ SST [3], то несложно понять, почему рассматриваемая модель ламинарно-турбулентного перехода изначально разрабатывалась с ориентацией на ее использование совместно с указанной моделью турбулентности ($k-\omega$ SST). Это сочетание осуществляется на основе традиционного подхода, предполагающего введение зависимости источниковых членов в уравнениях модели турбулентности от коэффициента перемежаемости γ . Для расчета поля значений γ формулируется дифференциальное уравнение переноса, в котором присутствуют только локальные операции. Это уравнение решается при задании на входе в расчетную область значения $\gamma = 1$. На стенках накладывается условие равенства нулю производной по нормали к стенке [1, 2].

Привлекаемые эмпирические корреляции, определяющие начало ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях, учитывают зависимость критического, построенного по толщине потери импульса, числа Рейнольдса $(Re_\theta)_{turb}$ от степени турбулентности Tu у внешней границы пограничного слоя и безразмерного параметра продольного градиента давле-

ния, включающего в свое определение и интегральную толщину пограничного слоя. Для ухода от локальных операций вводится ряд полуэмпирических алгебраических связей и формулируется искусственное уравнение переноса для вспомогательной величины \tilde{Re}_{0r} . Входное значение переносимой величины \tilde{Re}_{0r} определяется привлеченными эмпирическими корреляциями, а на стенках накладывается условие равенства нулю производной по нормали к стенке [1, 2]. Тем самым использование модели ламинарно-турбулентного перехода совместно с $k-\omega$ SST-моделью турбулентности не требует от пользователя постановки дополнительных граничных условий.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объектов исследования в работе рассматриваются три модели гребных винтов асимметричной формы (А, В и С) с разным дисковым отношением (от 0,6 до 1,16), характерные для современных быстроходных надводных судов. Некоторые результаты проведенного исследования были опубликованы в работе [4], однако в силу ограниченности объема публикации, в нее вошли только избранные сведения.

Экспериментальные данные для винтов А и С получены в Крыловском государственном научном центре. В качестве винта В взят международный тестовый винт РРТС, разработанный и исследованный в Потсдамском опытовом бассейне (Германия). Форма рассмотренных моделей гребных винтов показана на рис. 1 (см. вклейку), а их геометрические характеристики приведены в таблице.

Геометрические характеристики моделей гребных винтов

Характеристика	Модель А	Модель В	Модель С
Диаметр модели D , мм	228	250	200
Число лопастей Z	5	5	5
Шаговое отношение P/D	0,9	1,635	1,25
Дисковое отношение $AE/A0$	0,6	0,779	1,16
Угол саблевидности, град.	33	18,8	30

В качестве рабочего инструмента используется коммерческий пакет вычислительной гидродинамики Star-CCM+ версии 9, разработанный фирмой CD-Adapco. Задача решается в стационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству. В качестве модели турбулентности использована $k-\omega$ SST-модель Ментера в сочетании с моделью ламинарно-турбулентного перехода Ментера – Лэнгтри. В расчетах принята плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 1,141 \cdot 10^{-3} \text{ Па/с}$. На входной границе задается скорость потока, степень турбулентности и отношение турбулентной вязкости, на выход-

ной границе ставится условие свободного вытекания, на остальных внешних границах – условие проскальзывания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех трех исследованных моделей гребных винтов включение в расчетную схему модели ламинарно-турбулентного перехода позволяет повысить точность предсказания ГДХ. Сравнение результатов, полученных экспериментальным и расчетным методами, представлено на рис. 2. Здесь приведены зависимости коэффициента упора K_T , коэффициента момента K_Q и КПД от поступи винта $J = V/nD$, где V – скорость судна, м/с, n – частота вращения винта, об/с, D – диаметр винта, м. Коэффициенты упора и момента определяются по формулам

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}; \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5},$$

где T – упор гребного винта; Q – момент гребного винта.

Как видно из рисунка, разница между экспериментальными данными и результатами численного моделирования для проектных режимов снижения для коэффициента упора, с 5–15 до 2–4 % для коэффициента момента и с 3–8 до 0,5–2 %.

Для третьего рассмотренного гребного винта учет ламинарно-турбулентного перехода приводит к некоторому уменьшению коэффициента момента, что является улучшением результата для поступей менее 0,85 и ухудшением для поступей более 0,85. Это, скорее всего, объясняется различными режимами обтекания лопасти винта. Экспериментальная кривая также имеет перегиб в районе поступи 0,85.

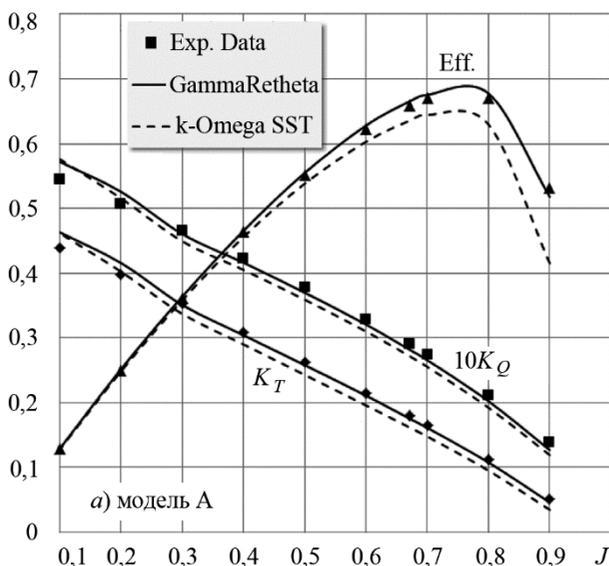


Рис. 2. Кривые действия гребного винта

Для всех трех рассмотренных моделей гребных винтов наблюдается снижение коэффициента трения на обеих сторонах лопастей (рис. 3, 4, см. вклейку) винта в случае использования модели ламинарно-турбулентного перехода, что и отражается в изменении интегральных коэффициентов гидродинамических сил и моментов, действующих на гребные винты. Картины распределения уровня турбулентной вязкости, приведенные на рис. 5 (см. вклейку), также свидетельствуют об изменении характера течения вблизи лопастей винтов и позволяют визуализировать ламинарные участки течения. На рис. 5 синим цветом показаны области течения, в которых турбулентная

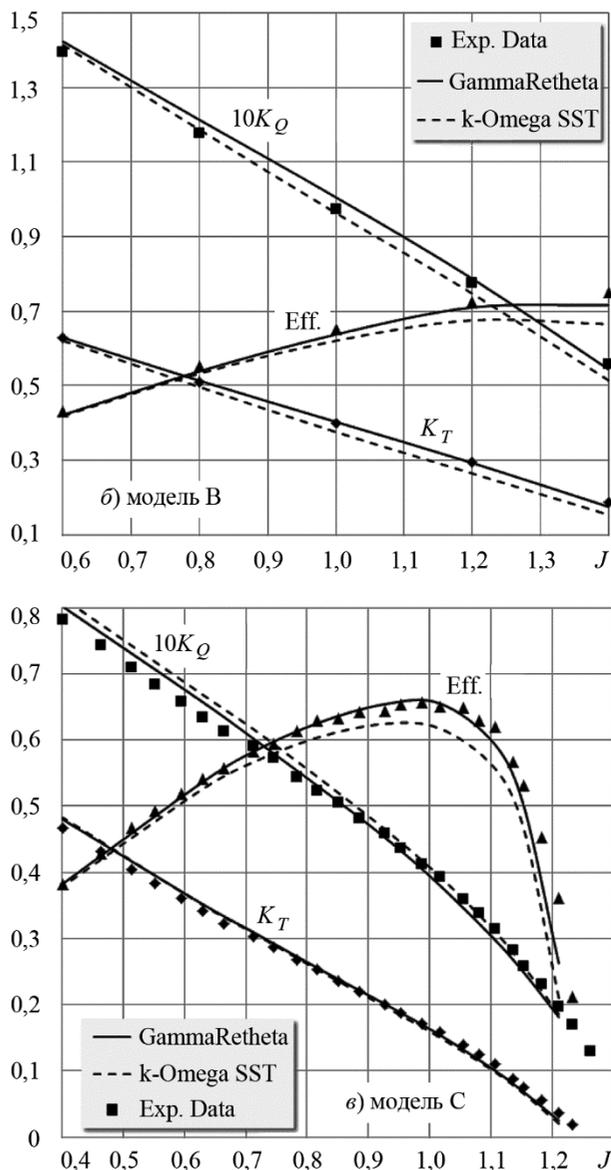


Рис. 2. Окончание

вязкость меньше молекулярной вязкости, т.е. течение в этих областях имеет скорее всего ламинарный характер.

Для третьей модели гребного винта (модель С) выполнено исследование зависимости КПД и коэффициентов упора и момента от степени внешней турбулентности. Показано, что модель ламинарно-турбулентного перехода обладает достаточной чувствительностью к этому параметру, наиболее четко заметной по зависимости КПД от поступи винта. На рис. 6 представлено несколько зависимостей КПД модели гребного винта С от поступи, полученных для различных значений уровня турбулентности в расчетной области. Уровень турбулентности замерялся непосредственно перед моделью гребного винта в плоскости, соответствующей началу ступицы винта. Очевидно, что для корректного сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными необходимо знать уровень турбулентности в экспериментальной установке, определить который не всегда является тривиальной задачей. Также при использовании модели ламинарно-турбулентного перехода нужно уделять повышенное внимание созданию расчетной сетки, т.к. уровни внешней турбулентности могут существенно различаться на входной границе и непосредственно перед гребным винтом в силу действия численной диффузии.

В последней части работы выполняется оценка масштабного эффекта для исследуемых винтов (см. рис. 7, 8). Учет модели ламинарно-турбулентного перехода позволяет предсказать масштабный эффект для широкого диапазона поступей гребного винта достаточно близко к методике МКОБ, что еще раз подтверждает точность проведенного исследования. Возможность оценки масштабного эффекта с высокой точностью особенно важна при проектировании движителей нетрадиционных форм или типов, когда существующие методики пересчета модельных испытаний не применимы. В этом случае численное моделирование является един-

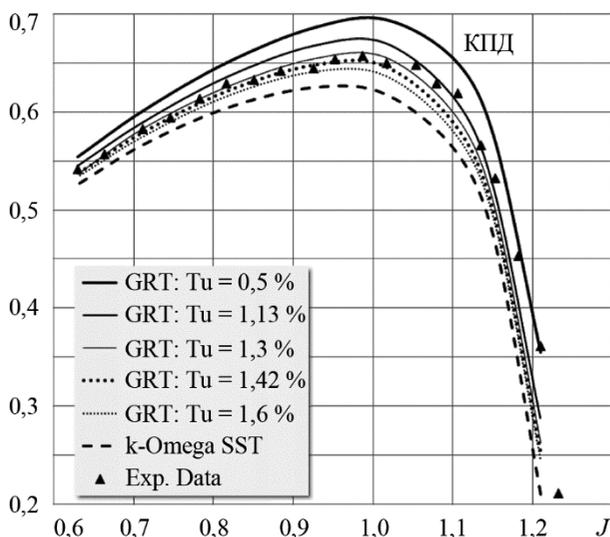


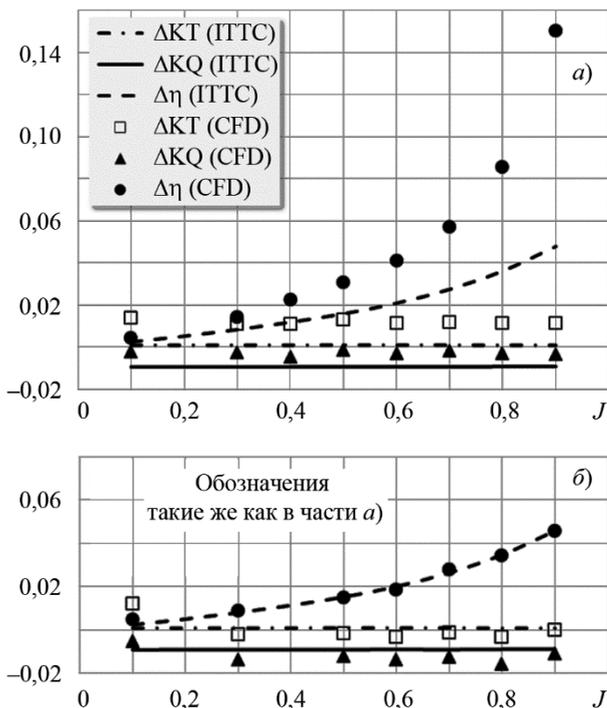
Рис. 6. Зависимость КПД гребного винта (модель С) от уровня внешней турбулентности

Рис. 7. Сравнение масштабного эффекта, полученного численным методом (символы) и по методике МКОБ (линии), для модели гребного винта А:

а) модель турбулентности

$k - \omega$ SST;

б) модель ламинарно-турбулентного перехода



ственным надежным способом оценки масштабного эффекта. Использование верифицированных технологий численного моделирования повышает уверенность в прогнозах ГДХ проектируемых движителей, что необходимо в условиях жесткой конкуренции за потенциального потребителя. Следует отметить, что простое применение коммерческого программного продукта без отработки соответствующих технологий расчета и их верификации не обеспечивает точности результатов, продемонстрированных в данной работе. Именно отработка таких технологий, включая разработку требований к локальным особенностям расчетных сеток, позволяет в Крыловском государственном научном центре получать результаты с достаточной для практического использования точностью.

Принимая во внимание тот факт, что погрешность в 1 % при определении КПД гребного винта приводит к ошибке определения потребной мощности в 1 % и ошибке определения скорости хода судна в 0,3 %, несложно сделать вывод о том, что погрешность в определении КПД натурного движителя около 5 % уже приведет к погрешности в определении скорости хода, сравнимой с условиями применения штрафных санкций. Поэтому использование модели ламинарно-турбулентного перехода в численном моделировании открывает весьма важные возможности для судостроительных конструкторских и проектных организаций. Это позволяет не только определять ГДХ движителей с достаточной для проектирования точностью, но и принимать взвешенные решения по ходкости судна и обоснованно повышать привлекательность предложений для Заказчика.

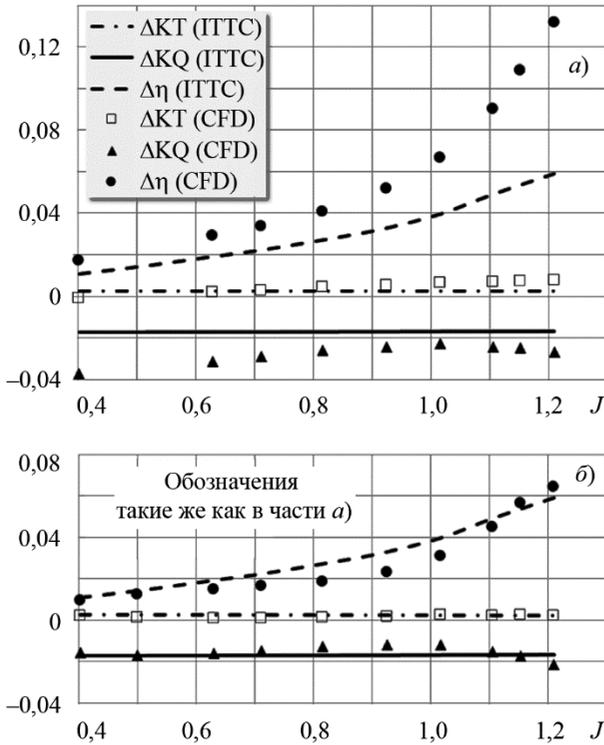


Рис. 8. Сравнение масштабного эффекта, полученного численным методом (символы) и по методике МКОб (линии), для модели гребного винта С:

а) модель турбулентности $k - \omega$ SST;
 б) модель ламинарно-турбулентного перехода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для трех моделей гребных винтов различной формы выполнено построение расчетных сеток и численное моделирование обтекания в пакете Star-CCM+. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Показано, что использование модели турбулентности $k - \omega$ SST совместно с моделью ламинарно-турбулентного перехода $\gamma - Re_\theta$ значительно повышает точность предсказания ГДХ по сравнению со стандартной моделью турбулентности $k - \omega$ SST.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Völker S.A. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation // ASME J. Turbomachinery. 2006. V. 128. № 3. P. 413–422.
2. Панов Д.О., Смирнов Е.М., Таранов А.Е., Лобачев М.П. Моделирование ламинарно-турбулентного перехода в задаче численного определения кривых действия гребного винта // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78 (362). С. 29–42.
3. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605.
4. Taranov A., Lobachev M. Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading. P. 1–4. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7100634>.