

УДК 004.942

DOI:10.37890/jwt.vi83.598

Выбор модели турбулентности при математическом моделировании работы гребного винта

С.С. Герасимов

ORCID: 0009-0008-6699-4243

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

Аннотация: математическое моделирование широко применяется для решения прикладных задач в области безопасности судоходства. Моделирование движения судна включает в себя моделирование работы гребного винта, создающего гидродинамические процессы в области кормы. Качество результатов моделирования зависит от используемых математических моделей. Турбулентность, возникающая при вращении гребного винта, описывается с помощью специальной модели турбулентности. В настоящее время существует три основные математические модели турбулентности: $k - \varepsilon$, $k - \omega$ и уравнения напряжений Рейнольдса. Выбор наиболее подходящей модели может быть осуществлен с помощью проведения численного эксперимента. В данной статье представлены результаты численного эксперимента, направленного на сравнение вышеуказанных моделей турбулентности, и их анализ на примере решения конкретной задачи.

Ключевые слова: безопасность судоходства, модель турбулентности $k - \varepsilon$, модель турбулентности $k - \omega$, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика, уравнения напряжений Рейнольдса

Choosing a turbulence model for mathematical modeling of propeller operation

Sergey S. Gerasimov

ORCID: 0009-0008-6699-4243

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: mathematical modeling is widely used to solve applied problems in the field of shipping safety. Modeling of ship motion includes modeling the operation of the propeller, which creates hydrodynamic processes in the stern area. The quality of the modeling results depends on the mathematical models used. Turbulence arising from the rotation of the propeller is described using a special turbulence model. Currently, there are three main mathematical models of turbulence: $k - \varepsilon$, $k - \omega$ and Reynolds stress equations. The most suitable model can be selected by conducting a numerical experiment. This article presents the results of a numerical experiment aimed at comparing the above turbulence models and their analysis using the example of solving a specific problem.

Keywords: shipping safety, $k - \varepsilon$ turbulence model, $k - \omega$ turbulence model, mathematical modeling, computational fluid dynamics, Reynolds stress equations

Введение

В связи с активным развитием математического моделирования, имеющим междисциплинарный характер, оно нашло широкое применение при решении прикладных задач в области безопасности судоходства. Отправной точкой при моделировании движения судов является моделирование работы (вращения) гребного

винта. Качество разрешения гидродинамических процессов, возникающих при вращении гребного винта, зависит от многих факторов, таких как размер объёмной сетки, дискретизации по времени (шаг по времени), корректности задания граничных условий, а также от выбора модели турбулентности. В настоящее время существует и активно применяется несколько основных моделей турбулентности, каждая из которых имеет свои специфические особенности и рекомендации к применению [1][2][3][4]. В данной работе рассматривается применение трёх моделей турбулентности:

1. Модель турбулентности $k - \varepsilon$;
2. Модель турбулентности $k - \omega$ [5];
3. Модели для турбулентных напряжений Рейнольдса [6].

Оценить сходимость результатов математического моделирования, полученных при использовании каждой из вышеуказанных моделей турбулентности, предполагается с помощью проведения численного эксперимента, подробное описание которого представлено в следующем разделе. Чистота эксперимента обеспечивается идентичностью всех прочих параметров рассматриваемых математических моделей [7].

Материалы и методы

Для выполнения математического моделирования работы (вращения) гребного винта необходим выбор математической модели для описания турбулентных эффектов в жидкости. В данной работе рассматриваются три математические модели: M1, M2 и M3, в которых были использованы $k - \varepsilon$, $k - \omega$ модели турбулентности и модель осредненных напряжений по Рейнольдсу соответственно. Все прочие параметры рассматриваемых моделей одинаковы, что обеспечивает чистоту эксперимента. Основные параметры моделей M1, M2 и M3 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики математических моделей

Наименование параметра	M1	M2	M3
Материал	Жидкость	Жидкость	Жидкость
Количество фаз, шт	1	1	1
Тип решателя	Нестационарный неявный	Нестационарный неявный	Нестационарный неявный
Модель турбулентности	$k - \varepsilon$	$k - \omega$	Осреднение по Рейнольдсу
Скорость вращения гребного винта, рад/с	10	10	10
Диаметр гребного винта, м	1,8	1,8	1,8
Тип расчетной сетки	Многогранные ячейки	Многогранные ячейки	Многогранные ячейки
Физическое время расчета, с	6,3	6,3	6,3
Дискретизация по времени, с	0,001	0,001	0,001
Базовый размер расчетной сетки, м	0,13	0,13	0,13

В рассматриваемых математических моделях M1, M2 и M3 установлены специальные индикаторы $V_1 - V_6$, представляющие собой систему произвольных объёмов, равноудалённых друг от друга по глубине на 0,5 м. В каждом из

индикаторов на протяжении всего времени расчета модели фиксируется максимальное значение скорости движения воды v_{max} . Общая схема расположения контрольных индикаторов представлена на рисунке 1.

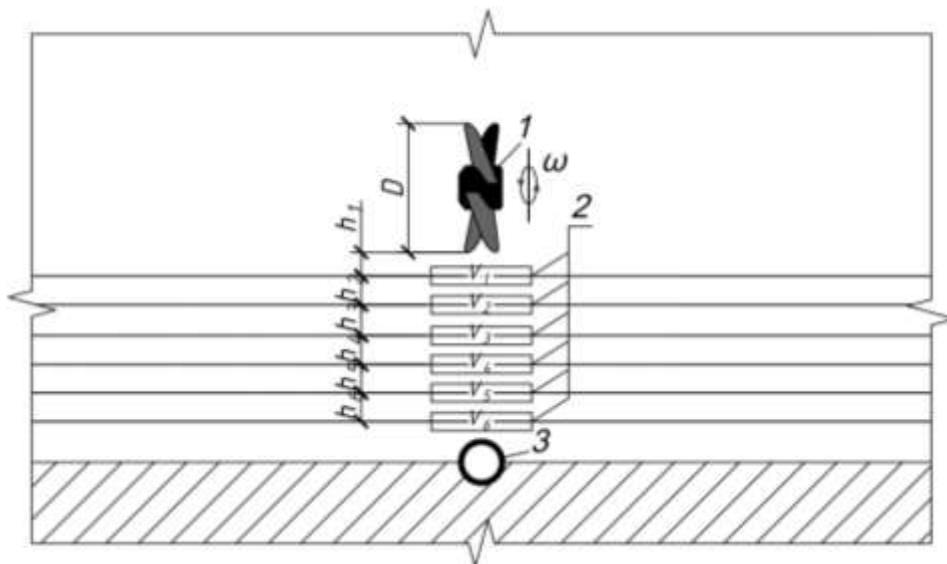


Рис. 1. Общая схема расположения контрольных индикаторов
Условные обозначения: 1 – гребной винт, 2 – контрольные индикаторы, 3 – оголенный МТ

Разработанная математическая модель имитирует вращение четырехлопастного гребного винта с внешним диаметром 1,8 м, не имеющего иных дополнительных линейных и нелинейных перемещений, расположенного в стоячей воде (начальная скорость движения воды равна нулю). За время расчета модели винт совершает 20 полных оборотов вокруг своей оси.

Суть данного численного эксперимента заключается в сравнении значений максимальной скорости v_{max} , полученных при расчете математических моделей М1, М2 и М3, отличающихся между собой только используемой моделью турбулентности. Результаты эксперимента и их анализ представлены в следующем разделе.

Результаты

В процессе расчета моделей М1 и М2 программный комплекс сформировал кривые изменения максимальной скорости v_{max} в каждом из контрольных индикаторов $V_1 - V_6$. Данные кривые для модели М1, М2 и М3 представлены на рисунках 2, 3, 4 соответственно.

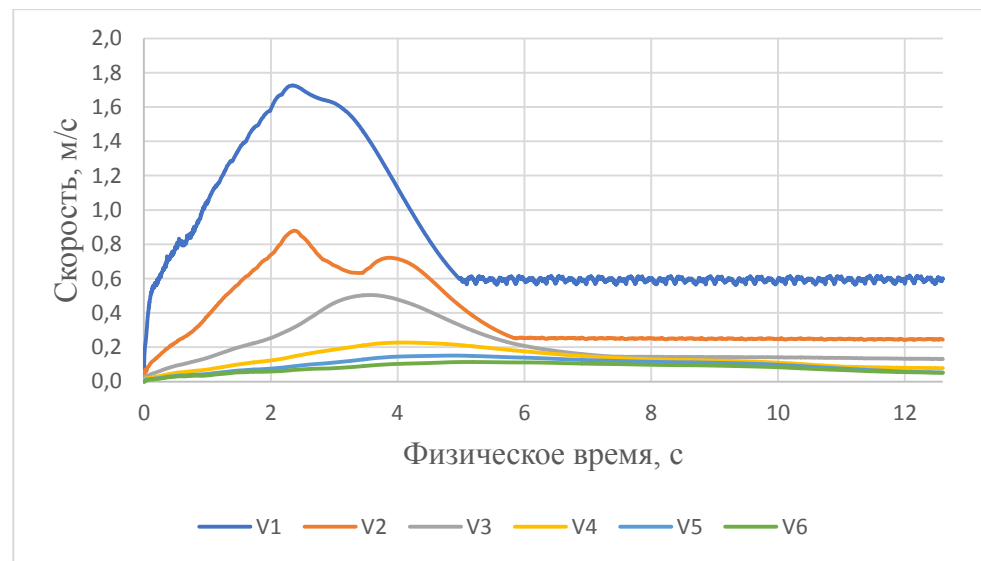


Рис. 2. Изменение максимальной скорости движения воды в контрольных индикаторах ($k - \varepsilon$)

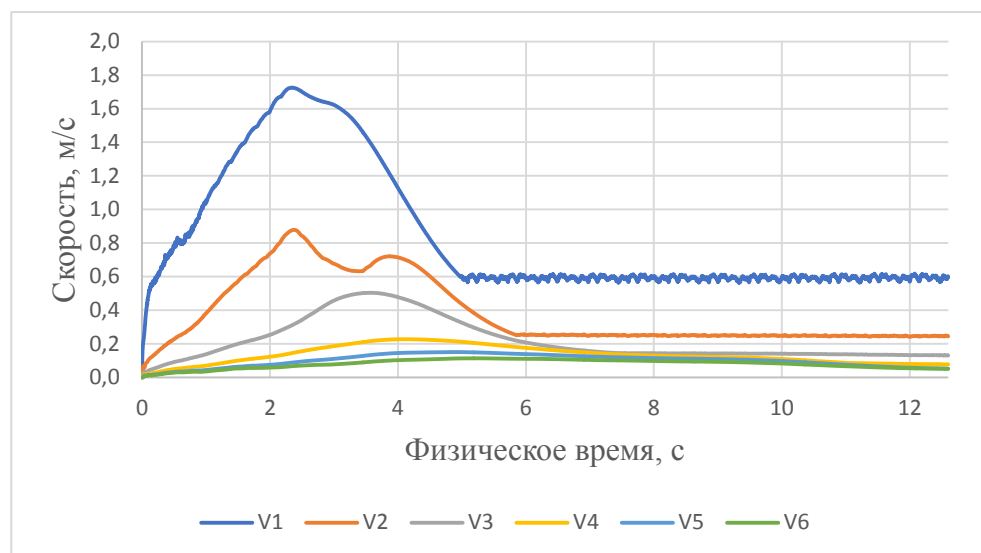


Рис. 3. Изменение максимальной скорости движения воды в контрольных индикаторах ($k - \omega$)

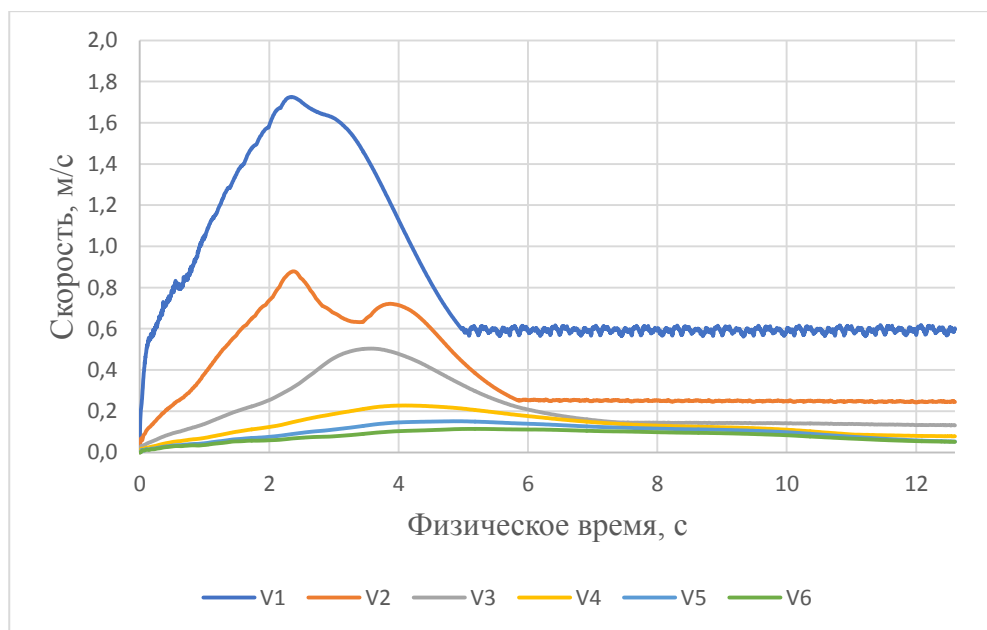


Рис. 4. Изменение максимальной скорости движения воды в контрольных индикаторах (Reynolds stress equation model)

В таблице 2 представлены максимальные значения скорости движения воды, зафиксированные в пределах каждого индикатора по каждой из расчетных моделей.

Таблица 2

Максимальные скорости движения воды в контрольных индикаторах

№ индикатора	Скорость движения воды, м/с				
	M1	$ \Delta M1, M2 , \%$	M2	$ \Delta M2, M3 , \%$	M3
V_1	1,7258	0,02	1,7255	0,00	1,7255
V_2	0,8790	0,03	0,8787	0,00	0,8788
V_3	0,5042	0,04	0,5040	0,03	0,5038
V_4	0,2274	0,11	0,2276	0,04	0,2275
V_5	0,1513	0,21	0,1510	0,03	0,1511
V_6	0,1139	0,03	0,1139	0,01	0,1139
V_{cp}	0,6003	0,02	0,6001	0,00	0,6001

Как видно из таблицы 2, разница в значениях максимальной скорости движения воды составляет самое большее – десятые доли процента. При округлении до целого числа разница составляет 0%. Такой результат свидетельствует о том, что при моделировании вращения гребного винта в условиях данной задачи, при прочих равных условиях, хорошо подходит любая из рассматриваемых моделей турбулентности, на точность моделирования это существенно не влияет.

Визуализация результатов моделирования представлена в виде скоростного поля в скалярной и векторной формах на рисунке 5.

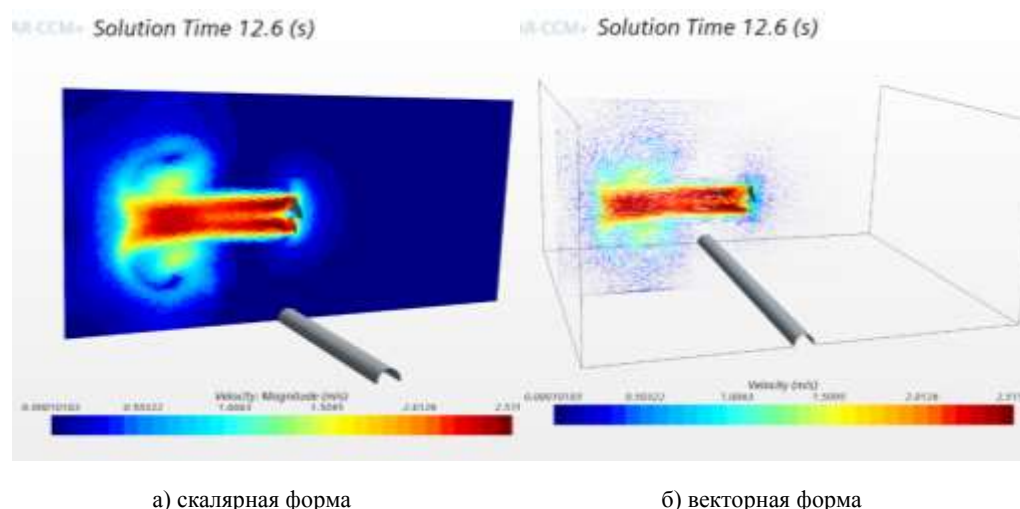


Рис. 5. Скалярное и векторное скоростные поля

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что:

1. Учет турбулентных процессов при математическом моделировании работы (вращения) гребного винта в рассматриваемой постановке задачи одинаково хорошо осуществляется с применением каждой из рассматриваемых моделей турбулентности: $k - \varepsilon$, $k - \omega$ или уравнения напряжений Рейнольдса.
2. Все расчетные модели, несмотря на различие используемых моделей турбулентности, имеют устойчивое решение.

Список литературы

1. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
2. Launder, B.E.; Spalding, D.B. (March 1974). "The numerical computation of turbulent flows". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269–289. DOI:10.1016/0045-7825(74)90029-2.
3. Bradshaw, P. (1971), An introduction to turbulence and its measurement, Pergamon Press, ISBN 0080166210
4. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)', H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988
5. Wilcox, D. C. (2008), "Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited", AIAA Journal, 46 (11): 2823–2838, Bibcode:2008AIAAJ..46.2823W, doi:10.2514/1.36541
6. Launder, Brian Edward and Reece, G Jr and Rodi, W (1975). "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure". Journal of Fluid Mechanics. 68 (3): 537–566. Bibcode:1975JFM...68.537L. doi:10.1017/s0022112075001814. S2CID 14318348.
7. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Ю.В. Юдин, М.В. Майсурадзе, Ф.В. Водолазский. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 124 с.

References

1. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. – М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.

2. Launder, B.E.; Spalding, D.B. (March 1974). "The numerical computation of turbulent flows". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269–289. DOI:10.1016/0045-7825(74)90029-2.
3. Bradshaw, P. (1971), An introduction to turbulence and its measurement, Pergamon Press, ISBN 0080166210
4. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)', H. Versteeg, W. Malalasekera; Pearson Education Limited; 2007; ISBN 0131274988
5. Wilcox, D. C. (2008), "Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited", AIAA Journal, 46 (11): 2823–2838, Bibcode:2008AIAAJ..46.2823W, doi:10.2514/1.36541
6. Launder, Brian Edward and Reece, G Jr and Rodi, W (1975). "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure". Journal of Fluid Mechanics. 68 (3): 537–566. Bibcode:1975JFM....68..537L. doi:10.1017/s0022112075001814. S2CID 14318348.
7. Organization and mathematical planning of an experiment: a tutorial / Yu. V. Yudin, M. V. Maisuradze, F. V. Vodolazsky. - Ekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2018. - 124 p

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Герасимов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры водных путей и гидротехнических сооружений, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Gerasimov.s.sergeevich@mail.ru

Sergey S. Gerasimov, postgraduate student of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; опубликована онлайн 20.06.2025.
Received 21.02.2025; published online 20.06.2025.