

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ВХОДЯЩЕЙ КРОМКИ ПРОФИЛЕЙ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА

Объект и цель научной работы. Объектом научного исследования являются ледовые профили семейства ИК 82 и гидродинамически обтекаемые профили NACA 66-mod. Цель работы – анализ целесообразности применения метода испытаний ледовых гребных винтов с использованием искусственной шероховатости входящей кромки.

Материалы и методы. Для проведения работы из оргстекла были изготовлены профили с размахом крыла 145,0 мм и длиной хорды 150,0 мм. В качестве искусственной шероховатости использовались корундовые частицы величиной 250 мкм. Область шероховатости – 2,5 % длины хорды (3,75 мм при длине хорды 150,0 мм). Работа была выполнена экспериментальным путем в гидродинамической трубе Крыловского центра, используемой для визуализации течений при малых скоростях потока. В качестве методов визуализации применялись метод подкрашенной жидкости и метод водородных пузырьков. Для фиксирования результатов испытаний использована высокоскоростная камера MEMRECAM GX-1. Видео съемка выполнена при 125 кадрах в секунду.

Основные результаты. При малых углах атаки, характерных для работы лопасти вблизи проектного режима гребных винтов, применение шероховатости приводит к турбулизации потока без качественного изменения обтекания профилей. Применение шероховатости на ледовых профилях при больших углах атаки, характерных для работы лопасти в зонах наибольшей подторможенности потока за корпусом, вызывает заметное изменение характера обтекания профилей с образованием отрывных структур. На тех же профилях без шероховатости подобных структур не наблюдается. Для гидродинамических профилей NACA 66-mod наличие шероховатости при больших углах атаки также приводит к определенным изменениям потока, но в этом случае крупномасштабных отрывных явлений не наблюдается и можно говорить о наличии явления нормальной турбулизации.

Заключение. Выполнено сравнение картин обтекания двух типов профилей: ледовых – ИК 82 и гидродинамически обтекаемых – NACA 66-mod с применением искусственной шероховатости входящей кромки и без нее. Исследование показало, что испытания моделей ледовых гребных винтов на кавитационных установках следует проводить без использования искусственной шероховатости входящей кромки лопастей.

Ключевые слова: профилировка, гидродинамические характеристики, модельные испытания, масштабный эффект.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Дарчиев Г.К., Пустошный А.В., Фролова И.Г., Орлов П.М. Анализ влияния шероховатости входящей кромки профилей на структуру потока. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 60–66.

УДК 629.5.011.231+532.58

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-60-66

G. Darchiev, A. Pustoshny, I. Frolova, P. Orlov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

LEADING EDGE ROUGHNESS EFFECT OF BLADE PROFILES UPON FLOW STRUCTURE

Object and purpose of research. This paper studies ice profiles of IK 82 family and hydrodynamically streamlined NACA 66-mod profiles. The purpose of this study is to analyse practicability of testing ice propellers with application of artificial roughness on their leading edge.

Materials and methods. To perform this study, organic-glass profiles were manufactured with wing span 145.0 mm and chord length 150.0 mm. Artificial roughness consisted of 250 μ m corundum particles. This roughness covered 2.5 % of the chord length (3.75 mm for chord length 150.0 mm). The experiments were performed in the Hydrodynamic tunnel of KSRC used to visualize slow currents. Visualization methods were painted-fluid and hydrogen-bubbles. Test results were recorded on video by MEMRECAM GX-1 high-speed camera. Frame rate of the recording was 125 fps.

Main results. At small angles of attack typical for propellers operating near their design points, roughness turbulizes the flow but does not cause any qualitative changes in the flow around blade profiles. Application of roughness on ice blade

profiles at high angles of attack typical for propeller operation in the areas of the greatest flow slowdown behind the hull leads to considerable changes in the flow around profiles and also causes vortex sheddings. The same profiles without roughness do not show any vortex shedding. For NACA 66-mod hydrodynamic profiles, roughness at large angles of attack also results in certain changes of the flow, however, without any major vortex sheddings, so turbulization in this case can be called normal.

Conclusion. This paper compares flow patterns for two blade profiles (IK-82 and hydrodynamically streamlined NACA 66-mod profiles) with and without artificial roughness on their leading edges. The study has shown that model tests of ice propellers in cavitation tunnels must be performed without artificial roughness on leading edges of their blades.

Key words: profiling, hydrodynamic performance, model tests, scale effect.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Darchiev G., Pustoshny A., Frolova I., Orlov P. Leading edge roughness effect of blade profiles upon flow structure. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 60–66 (in Russian).

УДК 629.5.011.231+532.58

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-60-66

Введение

Introduction

Основной инструмент изучения работы гребных винтов – испытания моделей винтов в кавитационных трубах. Одним из источников погрешности прогнозирования характеристик натурных гребных винтов по данным таких испытаний являются масштабные эффекты гидродинамических и кавитационных характеристик, связанные с невозможностью достичь в модельных условиях идентичного соотношения ламинарного и турбулентного режимов обтекания на лопастях. Поток на лопастях модельного гребного винта имеет развитый ламинарный участок, что не соответствует натурным условиям, где поток всегда является турбулентным. Один из путей уменьшения масштабного эффекта – испытания моделей гребных винтов при наибольших оборотах с целью максимального приближения к натурному числу Рейнольдса. Согласно рекомендациям [1], при достижении числом Рейнольдса, вычисленным по формуле

$$Re_p = 5 \frac{nD^2}{\nu} \frac{A_E}{A_0} \frac{1}{Z},$$

величины в диапазоне $(3-5) \cdot 10^5$ влияние масштабного эффекта будет минимизировано. Но, как показали испытания с применением метода красок, в большинстве случаев данного критерия недостаточно для турбулизации потока и на лопастях моделей остаются достаточно значительные ламинарные участки течения.

Согласно принятым в Крыловском центре методикам испытаний, для турбулизации потока на лопастях модельные испытания гребных винтов проводятся при высоких оборотах, достаточных для

возникновения автомодельности результатов испытаний. Однако в ряде зарубежных центров, таких как MARIN и SSPA, для турбулизации потока применяются методы с использованием искусственных турбулизаторов потока.

При проектировании ледовых гребных винтов, как правило, применяются специально разработанные профили. В данной работе исследуется влияние искусственной шероховатости вблизи входящей кромки на структуру обтекания ледовых профилей, используемых в Крыловском центре при проектировании гребных винтов для судов ледового плавания (профили семейства ИК 82), а также проводится сравнение картин обтекания профилей ИК 82 со структурой потока профилей семейства NACA 66-mod, обладающих лучшей обтекаемостью. Исследование выполняется методом визуализации потока, обтекающего профили различной толщины, соответствующие профилям цилиндрических сечений ледового гребного винта и гребного винта без ледового класса.

Описание геометрии выбранных профилей

Geometry of selected profiles

Для проведения испытаний в качестве ледовых профилей были выбраны профили семейства ИК 82, соответствующие цилиндрическим сечениям модели гребного винта № 8332 на $r/R = 0,7$ и $r/R = 0,9$. Данный гребной винт был спроектирован в ходе разработки гребных винтов газозавода «Ямал». Диаметр натурального гребного винта $D_p = 6,0$ м. Винт соответствует требованиям ледового класса ARC7 и рассчитан на работу при мощности 15 000 кВт.

Таблица 1. Геометрические характеристики профиля ИК 82

Table 1. Geometric parameters of IK-82 profile

$r/R = 0,7$			$r/R = 0,9$		
x , мм	Y_u , мм	Y_l , мм	x , мм	Y_u , мм	Y_l , мм
3,75	1,5	1,1	3,75	1,1	0,8
7,50	1,9	1,2	7,50	1,3	0,8
15,00	2,5	1,2	15,00	1,7	0,7
30,00	3,9	1,3	30,00	2,5	0,5
45,00	4,9	1,7	45,00	3,1	0,6
60,00	5,5	2,1	60,00	3,5	0,7
75,00	5,9	2,2	75,00	3,7	0,8
90,00	5,8	2,3	90,00	3,7	0,8
105,00	5,5	2,3	105,00	3,6	0,9
120,00	5,0	2,3	120,00	3,2	1,1
135,00	3,9	2,2	135,00	2,7	1,2
142,50	3,0	1,9	142,50	2,1	1,2
150,00	0,0	0,0	150,00	0,0	0,0

Максимальная толщина и кривизна профилей составляли 8,1 и 1,8 мм для $r/R = 0,7$; 4,5 и 1,5 мм для $r/R = 0,9$ (табл. 1, где Y_u – расстояние от хорды до засасывающей стороны профиля, Y_l – расстояние от хорды до нагнетающей стороны профиля).

Для сравнительного анализа были выбраны профили семейства NACA 66-mod (табл. 2), которые обладают меньшей толщиной в области входящей и выходящей кромок (рис. 1, 2), что позволяет достичь высоких гидродинамических характери-

Таблица 2. Геометрические характеристики профиля NACA 66-mod

Table 2. Geometric parameters of NACA 66-mod profile

$r/R = 0,7$			$r/R = 0,9$		
x , мм	Y_u , мм	Y_l , мм	x , мм	Y_u , мм	Y_l , мм
3,75	0,7	0,5	3,75	0,5	0,2
7,50	1,3	0,6	7,50	0,7	0,3
15,00	2,2	0,9	15,00	1,4	0,3
30,00	3,8	1,3	30,00	2,4	0,4
45,00	4,9	1,7	45,00	3,1	0,5
60,00	5,6	2,0	60,00	3,5	0,7
75,00	5,9	2,2	75,00	3,7	0,8
90,00	5,5	2,6	90,00	3,7	0,8
105,00	5,4	2,2	105,00	3,2	0,8
120,00	4,6	2,0	120,00	2,8	0,8
135,00	3,2	1,6	135,00	2,0	0,6
142,50	2,2	1,2	142,50	1,4	0,5
150,00	0,0	0,0	150,00	0,0	0,0

стик. Величины максимальной толщины и кривизны были приняты аналогичными профилям семейства ИК 82.

Для испытаний из оргстекла были изготовлены модели профилей с размахом крыла 145,0 мм и длиной хорды 150,0 мм.

Анализ и выбор размера корундовых частиц и области шероховатости

Analysis and sizing of corundum profiles and roughness area

Как было сказано во введении, на лопастях модели гребного винта всегда имеется ламинарный участок и, как следствие, исследовательские центры разрабатывают свои методики по турбулизации потока на лопастях гребного винта. В данной работе выполняется проверка целесообразности применения метода с использованием шероховатости входящей кромки.

Исследования показали [2], что при анализе влияния шероховатости на поток основным критерием является не число Рейнольдса, а число Рейнольдса по высоте шероховатости, которое вычисляется по следующему соотношению:

$$Rn_Q = \frac{V_k \cdot k}{\nu},$$

где V_k – скорость на границе пограничного слоя; k – высота шероховатости; ν – кинематическая вязкость.

Исходя из анализа формулы расчета числа Рейнольдса по высоте шероховатости, а также рекомендаций по выбору величины шероховатости [3–6], были выбраны следующие параметры шероховатости: размер используемых корундовых частиц – 250 мкм, что в результате дает шероховатость величиной ~30 мкм; область шероховатости – 2,5 % длины хорды (3,75 мм при длине хорды 150,0 мм).

Постановка эксперимента по визуализации потока

Flow visualization experiment

Все испытания были выполнены в вертикальной гидродинамической трубе Крыловского центра, используемой для визуализации течений при малых скоростях потока. В качестве методов визуа-

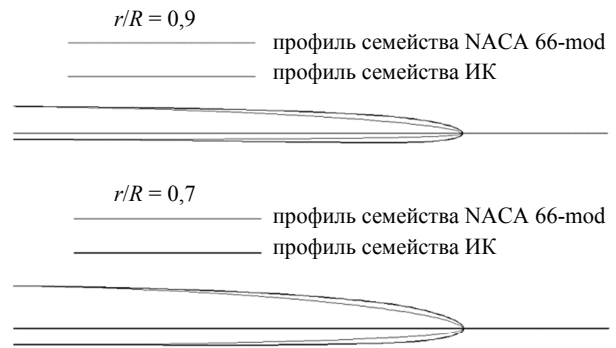


Рис. 1. Сравнение профилей. Входящая кромка

Fig. 1. Comparison of profiles. Leading edge

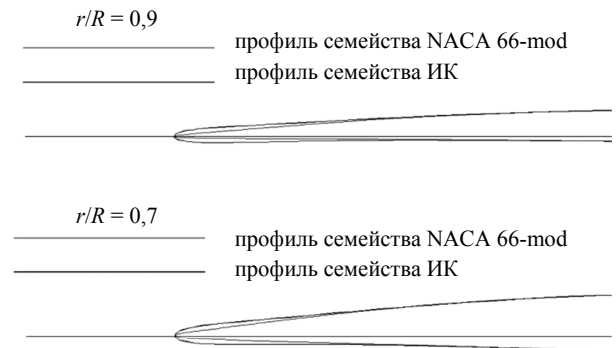


Рис. 2. Сравнение профилей. Выходящая кромка

Fig. 2. Comparison of profiles. Trailing edge

лизации применялись метод подкрашенной жидкости и метод водородных пузырьков.

Метод подкрашенной жидкости состоит в том, что через специальные дренажные отверстия на профиле подается поток подкрашенной жидкости, которая поступает из емкости, расположенной выше уровня воды в экспериментальной установке.

Суть метода водородных пузырьков заключается в подаче водородных пузырьков с проволоочного катода, расположенного поперек потока над испытуемой моделью, что позволяет наблюдать структуру линий тока при обтекании тела.

Для фиксации результатов испытаний использовалась высокоскоростная камера MEMRECAM GX-1. Видеосъемка выполнялась при 125 кадрах в секунду.

Для анализа влияния шероховатости входящей кромки на характеристики потока были проведены исследования по визуализации ламинарного обте-

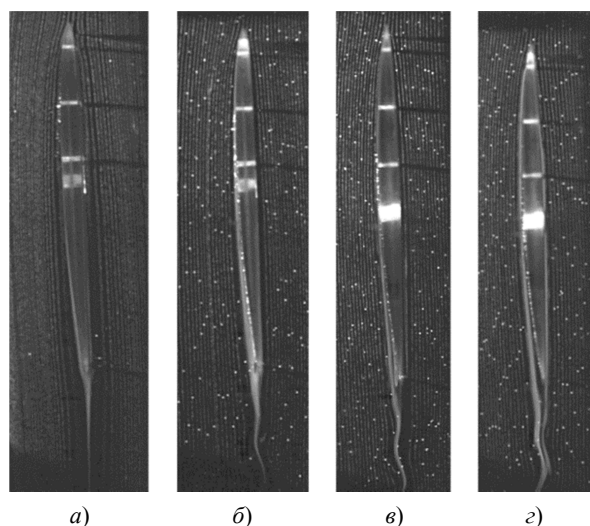


Рис. 3. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без нее при угле атаки 2° : ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль NACA 66-mod без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке. $r/R = 0,7$

Fig. 3. Test results for blade profiles with and without roughness at the angle of attack 2° : ice profile without (a) and with (b) roughness on its leading edge; NACA 66-mod profile without (c) and with (d) roughness on its leading edge. $r/R = 0.7$

кания профилей семейства ИК 82 и эквивалентных профилей NACA 66-mod как с применением шероховатости входящей кромки, так и без нее. Испытания проходили при углах атаки 2° и 4° и при скорости набегающего потока 0,1 и 0,2 м/с.

Анализ результатов испытаний

Test data analysis

На рис. 3–6 представлены результаты испытаний профилей при углах атаки 2° и 4° .

Приведенные результаты испытаний демонстрируют, что при малом угле атаки (2°) шероховатость не оказывает значительного воздействия, поэтому можно считать, что она не будет влиять на характеристики обтекания (рис. 3, 5). Это справедливо как для профилей типа ИК 82, так и в случае профилей семейства NACA 66-mod.

Совершенно другая картина наблюдается при большем угле атаки (4°), характерном для работы лопасти в зонах наиболее подторможенного потока. Так, на профиле NACA 66-mod с искусственной шероховатостью входящей кромки наблюдается

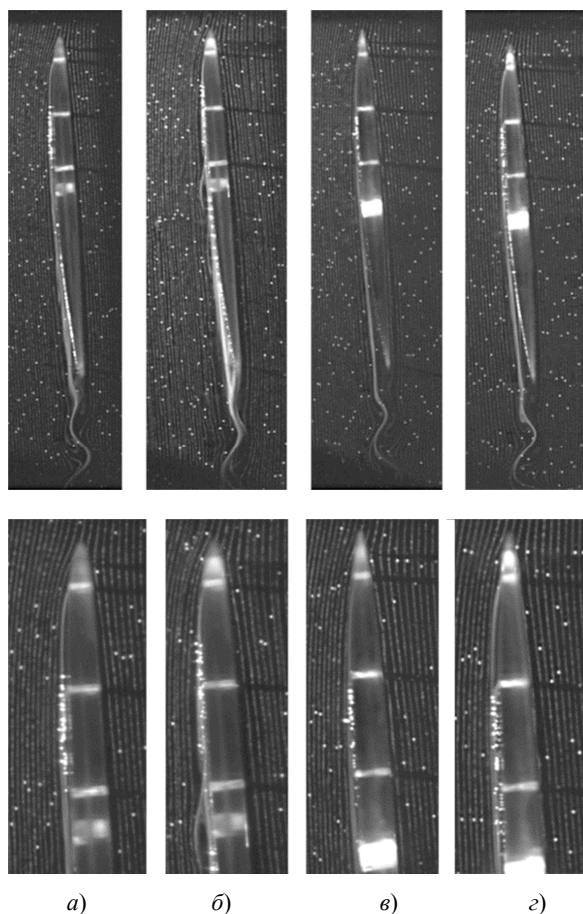


Рис. 4. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без нее при угле атаки 4° : ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль NACA 66-mod без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке. $r/R = 0,7$

Fig. 4. Test results for blade profiles with and without roughness at the angle of attack 4° : ice profile without (a) and with (b) roughness on its leading edge; NACA 66-mod profile without (c) and with (d) roughness on its leading edge. $r/R = 0.7$

образование вихревых структур с засасывающей стороны профиля, что хорошо видно на рис. 4 и 6, а также возникновение возвратного течения в области выходящей кромки (рис. 4). Все эти факторы свидетельствуют о турбулизации течения. На профиле ИК появляются значительно более выраженные отрывные структуры (особенно явно отмечающиеся для более тонких профилей, рис. 6), которые приводят к изменению характера обтекания как на засасывающей стороне профиля, так и в следе за профилем.

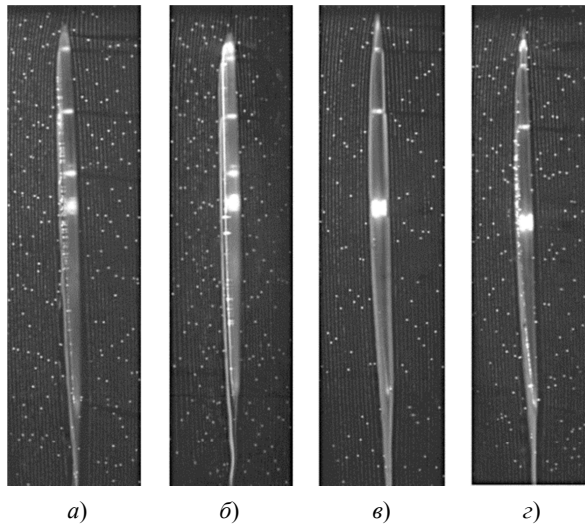


Рис. 5. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без нее при угле атаки 2° ; ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль NACA 66-mod без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке. $r/R = 0,9$

Fig. 5. Test results for blade profiles with and without roughness at the angle of attack 2° : ice profile without (a) and with (b) roughness on its leading edge; NACA 66-mod profile without (c) and with (d) roughness on its leading edge. $r/R = 0.9$

Заклучение

Conclusion

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

При малых углах атаки, характерных для работы лопасти вблизи проектного режима, применение шероховатости приводит к турбулизации потока без качественного изменения обтекания профилей.

Применение шероховатости на ледовых профилях при больших углах атаки, характерных для работы лопасти в зонах наибольшей подторможенности потока за корпусом, приводит к заметному изменению характера обтекания профилей с образованием отрывных структур. На тех же профилях без шероховатости подобных структур не наблюдается.

Для гидродинамических профилей NACA 66-mod наличие шероховатости при больших углах атаки также приводит к определенным изменениям потока, но в этом случае крупномасштабных отрывных явлений не наблюдается и можно говорить о наличии явления нормальной турбулизации.

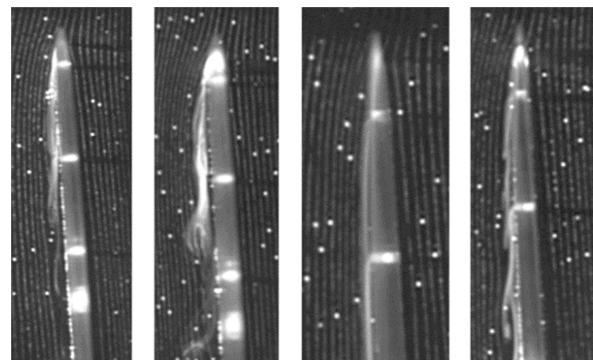
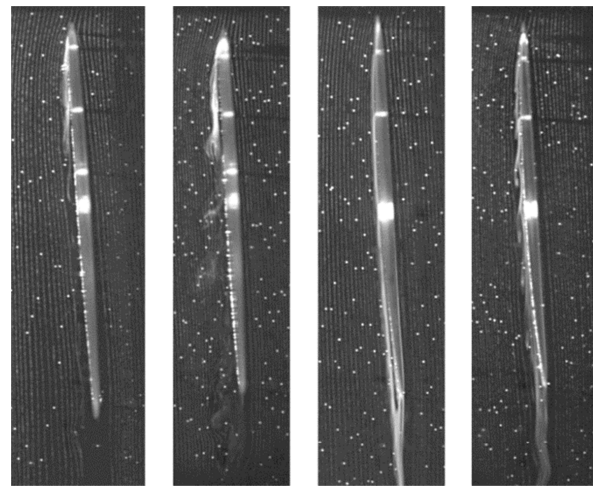


Рис. 6. Результаты испытания профилей с шероховатостью и без нее при угле атаки 4° ; ледовый профиль без (а) и с шероховатостью (б) на входящей кромке; профиль NACA 66-mod без (в) и с шероховатостью (г) на входящей кромке. $r/R = 0,9$

Fig. 6. Test results for blade profiles with and without roughness at the angle of attack 4° : ice profile without (a) and with (b) roughness on its leading edge; NACA 66-mod profile without (c) and with (d) roughness on its leading edge. $r/R = 0.9$

Fig. 6. Test results for blade profiles with and without roughness at the angle of attack 4° : ice profile without (a) and with (b) roughness on its leading edge; NACA 66-mod profile without (c) and with (d) roughness on its leading edge. $r/R = 0.9$

Таким образом, применение шероховатости на моделях ледовых гребных винтов может существенно исказить картину обтекания на режимах, соответствующих наибольшей подторможенности потока, и применения шероховатости для таких моделей гребных винтов нужно избегать, чтобы исключить непрогнозируемые результаты. В связи с этим следует рекомендовать проведение испытаний моделей ледовых гребных винтов на кавитационных установках без использования искусственной шероховатости входящей кромки лопастей.

Библиографический список

References

1. Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. [Ship Theory. Reference book. Under editorship of Ya. Voitkunsky. Vol. 1. Hydromechanics. Resistance of water to movement of ships. Marine propulsors. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985. (in Russian)].
2. Klebanoff P.S., Schubauer G.B., Tidstrom K.D. Measurements of the effect of two-dimensional and three-dimensional roughness elements on boundary-layer transition // J. Aero. Sciences. 1955. 22.
3. Kuiper G. Cavitation inception on ship propeller models // PhD-thesis Delft University of Technology. March, 1981.
4. Feindt E.G. Untersuchungen uber die abhangigkeit des umschlages laminar-turbulent von der oberachenrauigkeit und der druckverteilung // Jahrbuch STG. 1956. Bd. 50. P. 180–205.
5. Ligtelijn J.T., van der Kooij J., Kuiper G., van Gent W. Research on propeller-hull interaction in the depressurized towing tank // Hydrodynamics: computations, model tests and reality. Amsterdam – London – NY – Tokyo: Elsevier Science Publishers, 1992. P. 539–556.
6. Arndt R.E.A., 1976, Cavitation on model propellers with boundary layer trips // A.S.M.E. Conference on Polyphase Flow. New Orleans, USA.

Сведения об авторах

Дарчиев Георгий Константинович, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-47-62. E-mail: georgdarchiev@gmail.com.

Пустошный Александр Владимирович, д.т.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник-консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Фролова Ирина Геннадиевна, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-47-62. E-mail: irina.frolova@inbox.ru.

Орлов Павел Михайлович, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: +7 (921) 655-48-02. E-mail: orlov_p_m@mail.ru.

About the authors

Darchiev, Georgy K., Engineer 2nd category, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-47-62. E-mail: georgdarchiev@gmail.com.

Pustoshny, Aleksandr V., D. Sc., Corresponding Member of Russian Acad. Sc., Principal Research Scientist/Consultant, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (921) 230-30-16. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Frolova, Irina G., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-47-62. E-mail: irina.frolova@inbox.ru.

Orlov, Pavel M., Leading Engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: +7 (921) 655-48-02. E-mail: orlov_p_m@mail.ru.

Поступила / Received: 01.02.18
Принята в печать / Accepted: 05.03.18
© Коллектив авторов, 2018