УДК 629.12.037.11.001

# ВЛИЯНИЕ МАКРОШЕРОХОВАТОСТИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ

**Гузеев А.С., Короткин А.И.**

*ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия*

**АННОТАЦИЯ**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния рельефа поверхности круглых металлических дисков на их гидродинамическое сопротивление.

Различные варианты ориентации и размера рельефа поверхности дисков получены фрезерованием и соответствуют различным методикам обработки лопастей гидротурбин и гребных винтов.

Установленно влияние высоты и ориентации макрорельефа поверхности на сопротивление, а также отсутствие такого влияния при некоторых формах рельефа. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации методики обработки лопастей гидротурбин и гребных винтов.

## ВВЕДЕНИЕ

Новые достижения в технологии изготовления лопаток гребных винтов и гидротурбин с использованием многокоординатных фрезерных станков позволяют вести обработку лопастей гребного винта с предельно высокой точностью, а также создавать рельеф любой ориентации. Известны технические решения, связанные с созданием регулярного рельефа на лопастях гребного винта, повышающие его упор [1].

О влиянии рельефа поверхности гребного винта на момент его гидродинамического сопротивления можно судить по изменению момента сопротивления круглых дисков с аналогичным рельефом поверхности при их вращении вокруг оси [2]. Гребной винт с рельефом в виде гребешков, форма которых отработана по результатам испытаний серии круглых дисков, в некоторых случаях имеет повышенную эффективность [1].

Исследования влияния продольных рисок на гидродинамическое сопротивление показали, что в турбулентном пограничном слое происходит снижение сопротивления тела на 7-10% [4], такие риски имели в сечении треугольную форму, высоту 0,051 мм, основание 0,025 мм. В исследованиях, проведенных на плоской пластине установленно, что треугольные риски высотой 0,078 и основанием 0,097 мм дали снижение сопротивления на 4-5%, а риски высотой 0,17 мм и основанием 0,25 мм – на 7-8% [3]. В этой же работе указывается, что положительный результат дали также риски с одинаковой высотой и основанием треугольника 0,51 мм.

В связи с обсуждаемым эффектом заслуживает внимания тот факт, что тело акул покрыто чешуйками с характерным размером 0,2 ÷ 0,5 мм, имеющими от 3 до 7 ребер, расстояние между которыми может составлять 0,035 ÷ 0,105 мм, причем, чем меньше скорость плавания данного вида акул, тем шире расположение ребер [5]. На коротких отрезках скорость плавания акул может достигать 20 м/с ($Re=10^6$ $10^7$).

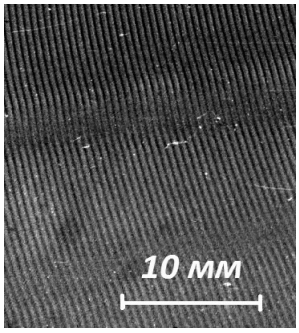
Современные технологии позволяют создавать покрытие имитирующие акулью кожу. По результатам исследований, изложенных в работе [8], такое покрытие может обеспечить снижение сопротивления. Кроме того, это покрытие препятствует прикреплению организмов, создающих обрастание, и способно самоочищаться при скорости 4-5 узлов.

В настоящей статье представлены результаты испытаний дисков диаметром 600 мм, изготовленных из бронзового сплава и органического стекла, с различным рельефом поверхности, на основе которых предполагается вести поиск рельефа поверхности, обеспечивающего наилучшие гидродинамические качества винта с учетом технологии его изготовления.

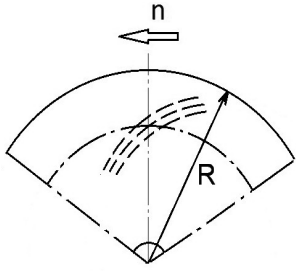
© Гузеев А.С., Короткин А.И.

## ХАРАКТЕКРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДИСКОВ

Для проведения исследований использованы 10 бронзовых дисков диаметром 600 мм и толщиной 16 мм. Поверхности дисков обрабатывались фрезерованием на универсальном фрезерном станке. Использованы две группы образцов. Первая группа - диски № 1, 2, 3 не имеют гребешков рельефа, но изготовлены с повышенной шероховатостью и различным направлением рисок-следов фрезы. Эти диски использованы для определения влияния направления рисок на сопротивление. Фрагмент диска с окружными рисками представлен на рис. 1.




а




б

Рис.1 Фрагменты дисков с рисками: а) - окружные риски, б) – схема наклонных рисок, расположенных по потоку, угол наклона - α = 38°, n – направление вращения диска.

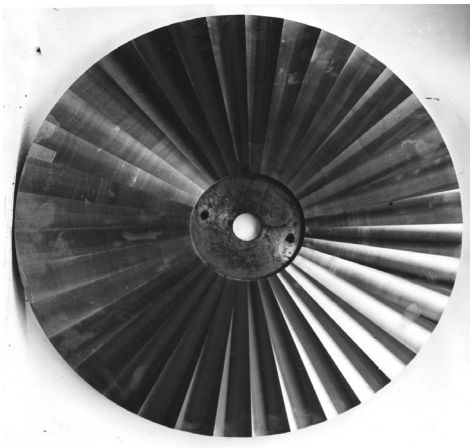
Диски второй группы № 4÷9 имеют гребешки рельефа, которые ориентированные по радиусу, по окружности, и по спирали Архимеда (рис. 2 в). Высота гребешков составляет 0,5 и 1,9 мм. Для исключения влияния микрошероховатости рисок чистота поверхности выдержана в предалах 8 класса, что соответствует высшему классу обработки гребных винтов [6]. Фотографии дисков и профиль рельефа представлены на рис. 2.

Отдельно испытан эталонный диск, обработанный без гребешков рельефа, с такой же шероховатостью, как и образцы второй группы. В таблице 1 приведены характеристики бронзовых дисков, высота гребешков указана для внешнего радиуса и уменьшается к центру.

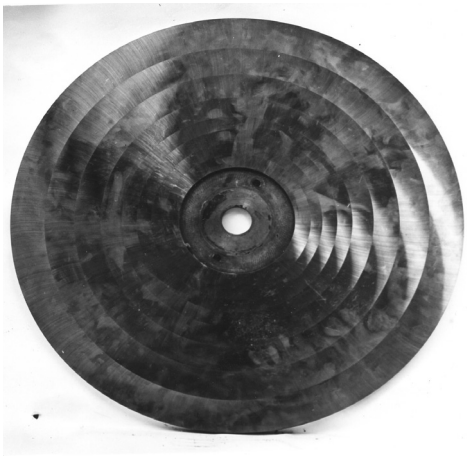
Таблица 1

| № диска | Характер макрорельефа дисков |
|---|---|
| 1 | Риски окружные |
| 2 | Риски наклонные, α=38° к окружности |
| 3 | Риски радиальные |
| 4 | Гребешки радиальные h=1,9 мм |
| 5 | Гребешки радиальные h=0,5 мм |
| 6 | Гребешки окружные h=1,9 мм |
| 7 | Гребешки окружные h=0,5 мм |
| 8 | Гребешки наклонные h=1,9 мм |
| 9 | Гребешки наклонные h=0,5 мм |
| 10, Эт | Эталонный диск |

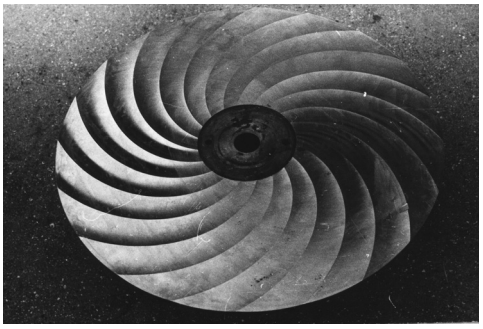
Были испытаны также два диска из оргстекла с окружными рисками, имеющими в поперечном сечении равносторонний треугольник с шагом 0,5 мм и 0,25 мм.



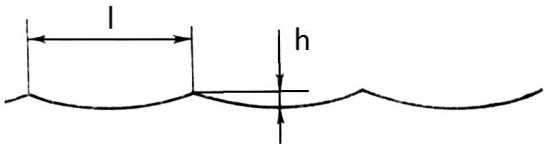
а)



б)



в)




г)

Рис.2 Диски с гребешками; а – радиальные, б) – окружные, в) – наклонные, г) – профиль макрорельефа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты измерения коэффициента момента сопротивления См трех дисков с рисками при их вращении в воде при температуре 16°С представлены на рис 3.

Под шкалой указаны значения скорости вращения диска *n об/с*. На этом же графике нанесена теоритическая кривая (Т), рассчитанная по формуле (1)

$$См = 0{,}951/(Lg\ Re_{г})^{2{,}58} \quad (1)$$

$$Re_{г} = \omega R^2/\gamma \quad (2)$$

где, R – радиус диска, $\gamma$ – коэффициент кинематической вязкости, $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость.

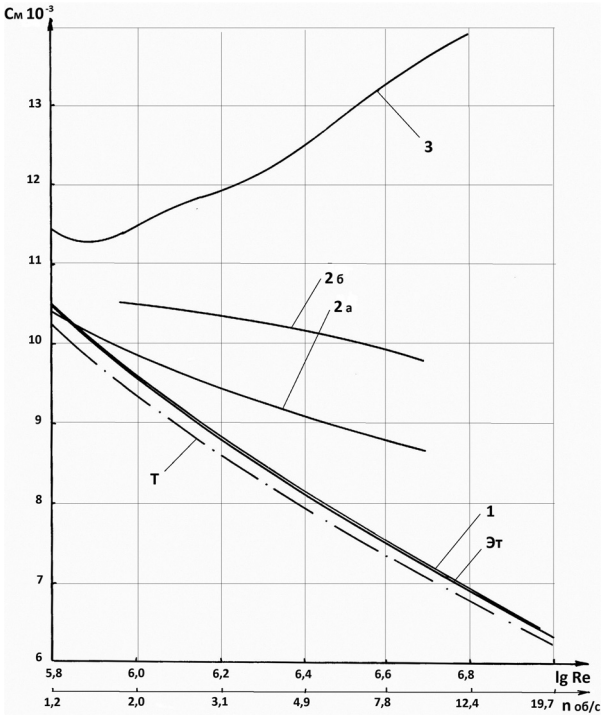



Рис.3 Зависимость коэффициента момента сопротивления от скорости вращения диска $C_м = F(Lg\ Re_г)$ для дисков с рисками.

Риски, расположенные по окружности (1), не дают дополнительного сопротивления при сравнении с эталонным гладким диском (Эт) во всем диапазоне скоростей вращения. Риски, расположенные в радиальном направлении (3), дают дополнительное сопротивление и с увеличением скорости вращения дополнительное сопротивление увеличивается.

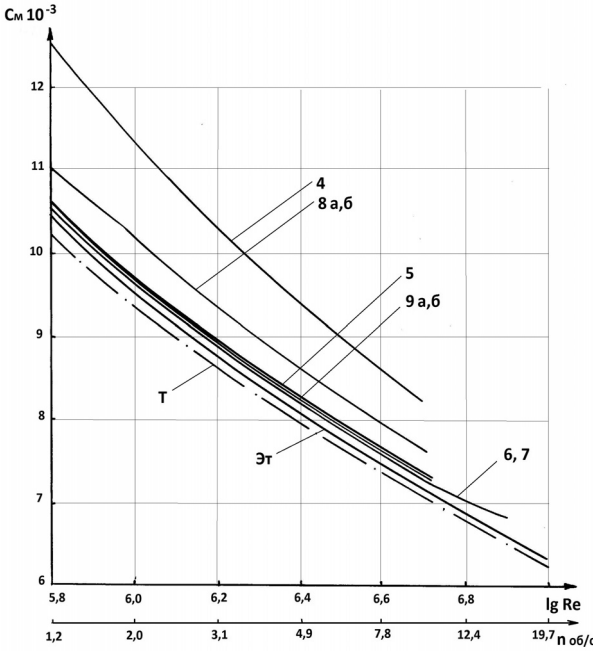



Рис.4 Зависимость коэффициента момента сопротивления от скорости вращения диска $C_м = F(Lg\ Re_г)$ для дисков с гребешками.

Риски под углом $\alpha = 38°$ к окружности (2а), расположенные на диске по потоку (рис. 1б), при значении Lg Re = 5,8 не дают дополнительного сопротивления, но с увеличением скорости вращения их сопротивление значительно

возрастает. Риски, расположенные под углом 38° в направлении против потока (2б), дают еще большее дополнительное сопротивление. Разница между кривыми 2а и 2б при изменении направления вращения на противоположное, составляет 6÷12 %.

Кривые сопротивления двух дисков с окружными гребешками (6, 7), дисков с радиальными (5) и спиральными (9а, 9б) гребешками высотой h = 0,5 мм практически совпадают с кривой эталонного диска (Эт), рис. 4.

Радиальное расположение гребешков высотой h=1,9 мм (4) дает дополнительное сопротивление, уменьшающееся с ростом скорости вращения. Наклонные гребешки высотой h = 1,9 мм (8а, 8б) дают небольшое дополнительное сопротивление, которое практически не зависит от направления вращения диска.

Испытания дисков из оргстекла с окружными треугольными рисками, имеющими шаг S = 0,5 мм и S = 0,25 мм, не дали снижения сопротивления в воде. Для этих дисков были проведены испытания в растворе полимера [7].

Одной из предполагаемых причин отсутствия положительного результата на оргстеклянных дисках с продольными ребрами является отсутствие возможности получить острую верхнюю кромку при обработке поверхности фрезерованием. Экспериментальные и теоретические исследования [8] показали, что снижения сопротивленя можно добиться при наличии острой верхней кромки.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Наличие окружных рисок не приводит к увеличению сопротивления диска. Изменение направления вращения диска с рисками, расположенными под углом α = 38° к окружности, приводит к увеличению сопротивления диска на величину ΔСм = 6÷12 %.

Радиальное расположение рисок при обработке поверхости по 3-му классу точности приводит к существенному росту сопротивления.

Окружные гребешки высотой до h = 1,9 мм не приводят к росту сопротивления диска по сравнению с фрезерованным эталонным диском.

Гребешки высотой до 0,5 мм, независимо от их ориентации в потоке, не дают дополнительного сопротивления по сравнению с гладким диском, обработанным по 8-му классу точности, в диапазоне Lg Re = 5,8÷6,7.

Использование полученных результатов при разработке технологии изготовления лопастей гребных винтов и гидротурбин может уменьшить трудоемкость изготовления за счет сокращения трудоемкой операции по шлифованию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенков П.М., Михайлов В.С., Тевелев Л.Г. Влияние рельефа поверхности гребных винтов на их гидродинамические характеристики. Судостроение 1987, №2, стр. 39-41. Lysenkov P.M., Mikhaylov V.S., Tevelev L.G. (1987). Vliyanie relefa poverkhnosti grebnykh vintov na ikh gidrodinamicheskie kharakteristiki [Effect of propeller surface profiles on their hydrodynamic characteristics]. Sudostroenie, no 2, USSR.
2. Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М., Транспорт, 1987, -224 стр. Katsman F.M. (1987). Ekspluatatsyia propulsivnogo kompleksa morskogo sudna [Operation of sea-going ship propulsion systems]. Moskow, Tansport, USSR.
3. Енютин Г.В. Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины. МЖГ, 1987, № 2, 140-145. Enyutin G.V. (1987). Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya prodolnogo orebreniya na soprotivlenie treniya ploskoy hlastiny [Experimental investigation of the effect of longitudinal ribs on friction resistance of a flat plate]. MZhG, no 2, pp. 140-145.
4. Walsh M.J. Lindeman A.M. Optimization and aplication of riblets for turbulent drog reduction. AIAA Paper, 84-347, 1984.
5. AIAA. Paper, 85-0546, 1985.
6. Справочник по теории корабля: Том 1. Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение 1985, 786 стр. Voytkunskiy Y.I. (1985). Spravochnik po teorii korablya [Ship theory handbook]. Vol. 1. Sudostroenie, Leningrad, USSR.

7. Гузеев А.С., Короткин А.И., Старцев С.Б. Экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления дисков с ребристой поверхностью. Тезисы докладов. Конф. по эксперим. гидродинамике. -Л.:НТО 1991. Guzeev A.S., Korotkin A.I. Startsev S.B. (1991). Eksperimentalnoe issledovanie gidrodinavicheskogo soprotivleniya diskov s rebristoy poverkhnostyu [Experimental investigation of hydrodynamic resistance of ribbed discs]. NTO, Leningrad, USSR.

8. Корабельное покрытие со структурой, иммитирующей акулью кожу. Дайджест зарубежной прессы. ВМС и Кораблестроение. Выпыск 67, специальный вып. № 2 . СПб, 2013 г. 253-254. Korabelnoe pokrytie so strukturoy immitiruyushchey akulyu kozhu [Ship coating simulating a shark skin texture. Digest of foreign press]. (2013). Daydzhest zarubezhnoy pressy. Vyp. 67, s.vup. no. 2, pp. 253-254. Sankt-Petersburg.

© Гузеев А.С., Короткин А.И.