



Крыловский
государственный
научный центр

Учет влияния технологической шероховатости поверхности при моделировании турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости.

М.П. Лобачев, А.А. Рудниченко, Т.И. Сайфуллин

CFD Weekend 2021

2021 год

Введение

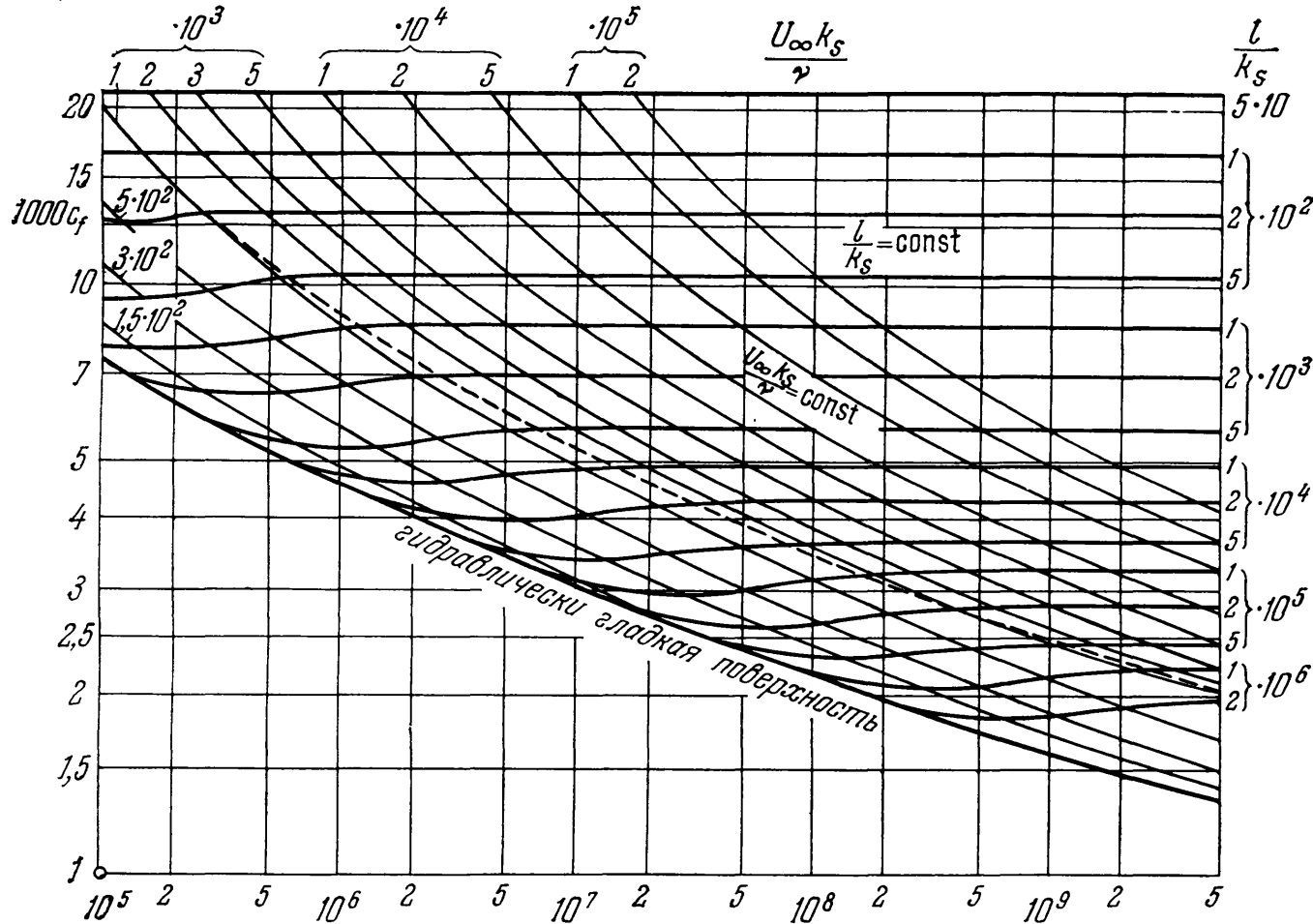
Какая бы совершенная математическая модель не была бы заложена в программный код, для решения практических задач в большинстве случаев требуется внесение той или иной эмпирической информации. В частности, такая информация требуется для учета влияния шероховатости на сопротивление трения реальных поверхностей. Это относится как к самому виду математической модели такого учета, так и к коэффициентам, входящим в модель. Причем для любых программных комплексов ориентированных на решение практических задач эта информация по своей сути одинакова.

Предлагаемые в данной работе подходы к введению в расчетные коды эмпирической информации по учету влияния шероховатости при моделировании турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости ориентированы на задачи для которых требуется как можно более точный расчет трения на твердых поверхностях. Для задач, в которых трение не играет существенной роли достаточно использовать концепцию эквивалентной песочной шероховатости, внедренную практически во все коммерческие коды.

Современное состояние в оценке учета влияния шероховатости

$$C_f = \frac{2F_x}{\rho U_\infty^2 S}$$

k_s - размер зерна эквивалентной песочной шероховатости, т.е. размер зерен песка который дает такой же коэффициент сопротивления, как фактическая шероховатость



Закон сопротивления пластины с песочной шероховатостью; $\frac{U_\infty l}{\nu}$ полный коэффициент трения. Г. Шлихтинг

В подавляющем большинстве кодов, включая коммерческие, для расчета турбулентных течений вязкой жидкости учет влияния шероховатости осуществляется с привлечением концепции так называемой **эквивалентной песочной шероховатости**.

Первоначальная разработка:

И. И. Никурадзе 1933 г.

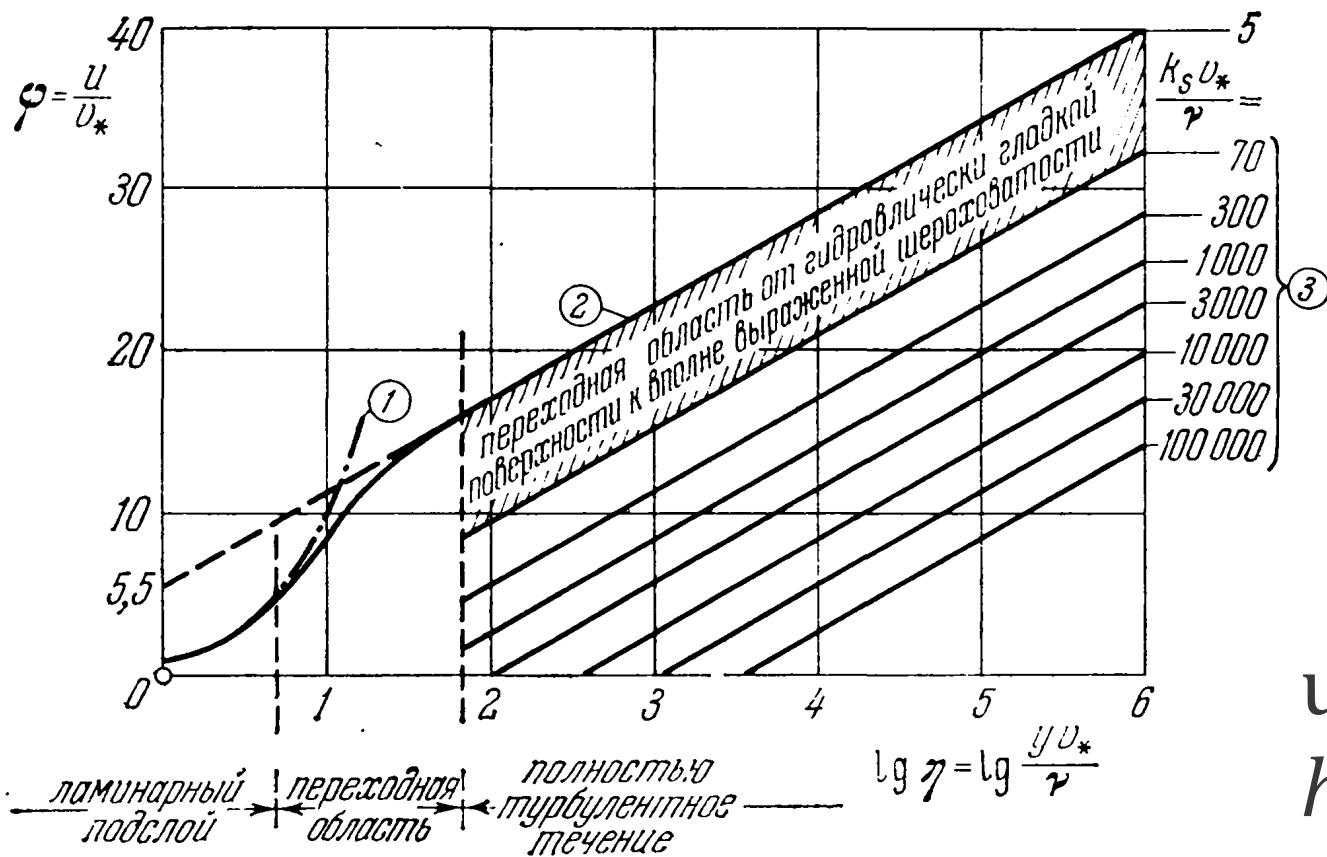
Л. Прандтль, Г. Шлихтинг 1934

Популяризация концепции:

Г. Шлихтинг «Теория пограничного слоя», первое издание 1951 г., последнее 2017 г.

Русский перевод 1956, 1969, 1974 г.

Влияние шероховатости поверхности на локальные и интегральные характеристики течения вязкой жидкости



Профиль скорости в пограничном слое

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln y^+ + B(h^+).$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(E' y^+),$$

$$E' = \frac{E}{f(h^+)}.$$

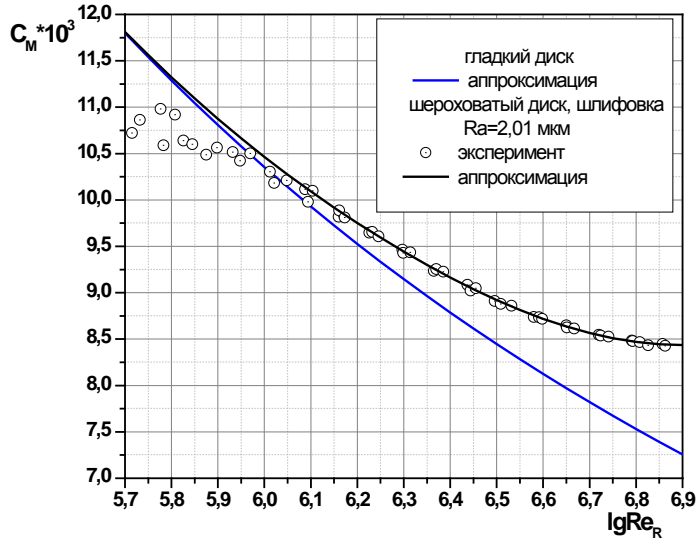
$$u^+ = u/u_\tau; y^+ = y u_\tau / \nu;$$

$$h^+ = h u_\tau / \nu; u_\tau = v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}.$$

Универсальный закон распределения скоростей (пристеночный закон) при турбулентном течении в гладких и шероховатых трубах, $k_s = h$.

Зависимости $B(h^+)$ или $f(h^+)$ являются сугубо индивидуальными для каждого вида геометрии шероховатости. Могут быть найдены только экспериментальным путем. 4

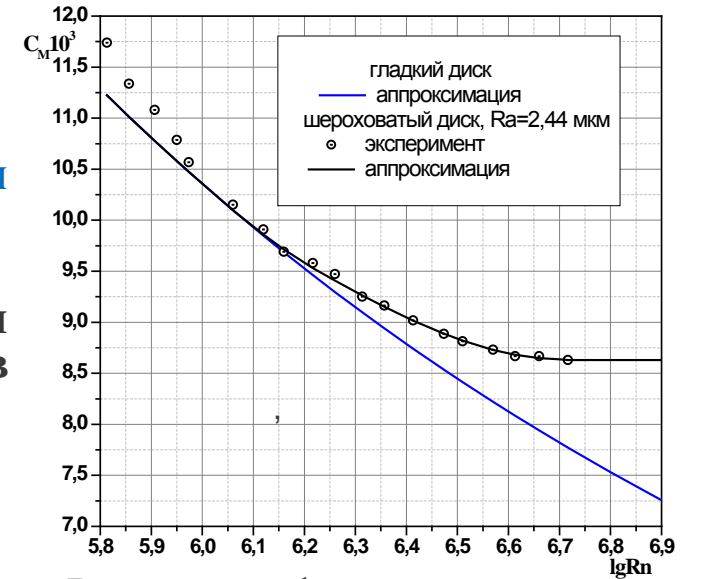
Влияние шероховатости поверхности на локальные и интегральные характеристики течения вязкой жидкости



Наилучшим объектом для исследования влияния шероховатости на интегральные характеристики являются вращающиеся диски

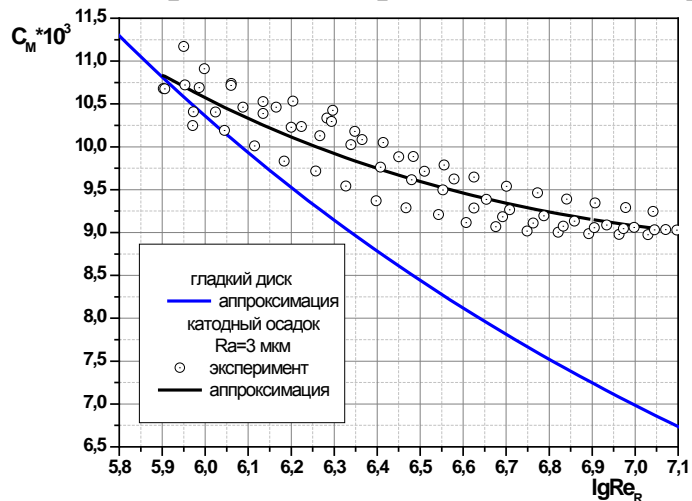
Зависимости коэффициента момента сопротивления вращению кругового диска C_M от числа Рейнольдса Re_R для различных видов технологической шероховатости

$$C_M = \frac{2M}{\rho \omega^2 R^5}, Re_R = \frac{\omega R^2}{\nu}$$



Риски шлифования по радиусу (поперек потока)

Риски шлифования в произвольном направлении



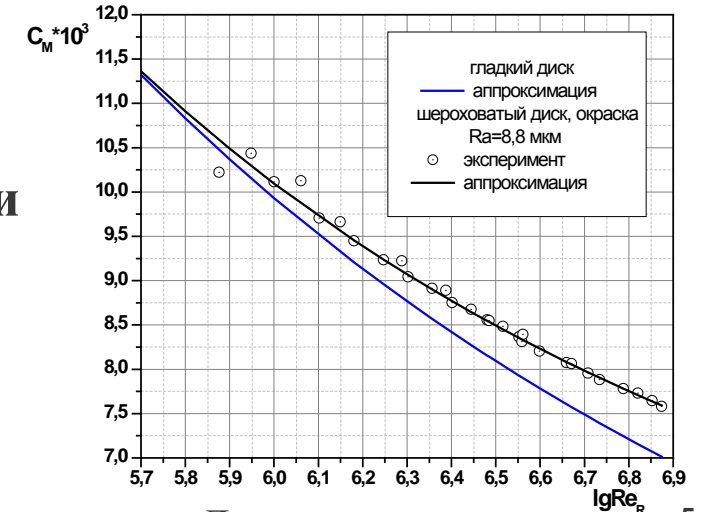
Катодный осадок

Аппроксимация осуществлялась по данным при $lgRe_R > 6,2$

Высотные параметры шероховатости

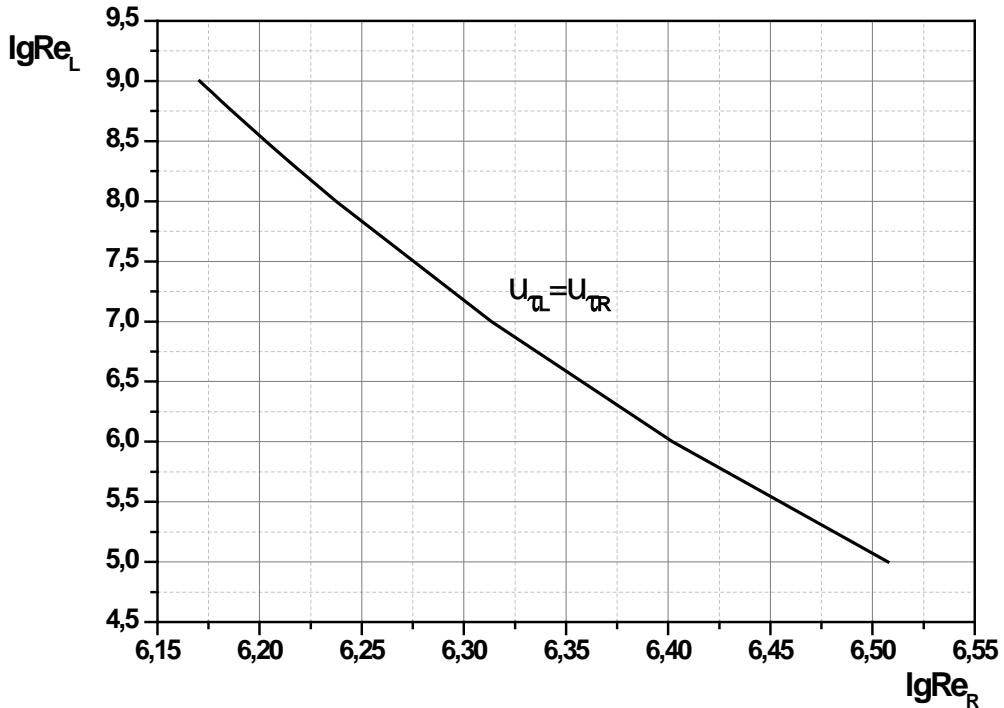
$$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y| \cdot dl,$$

$$Rz = 6,25 \cdot Ra$$



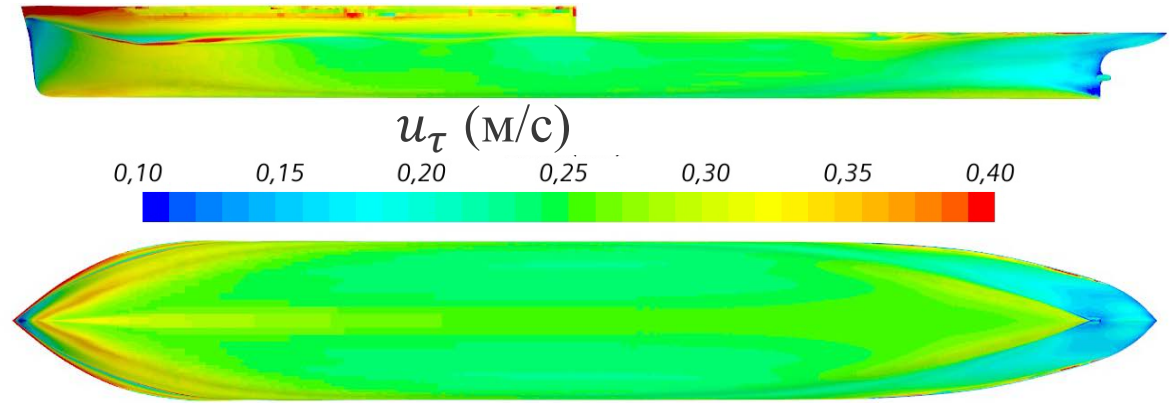
Лакокрасочное покрытие 5

Распределение динамических скоростей для различных объектов

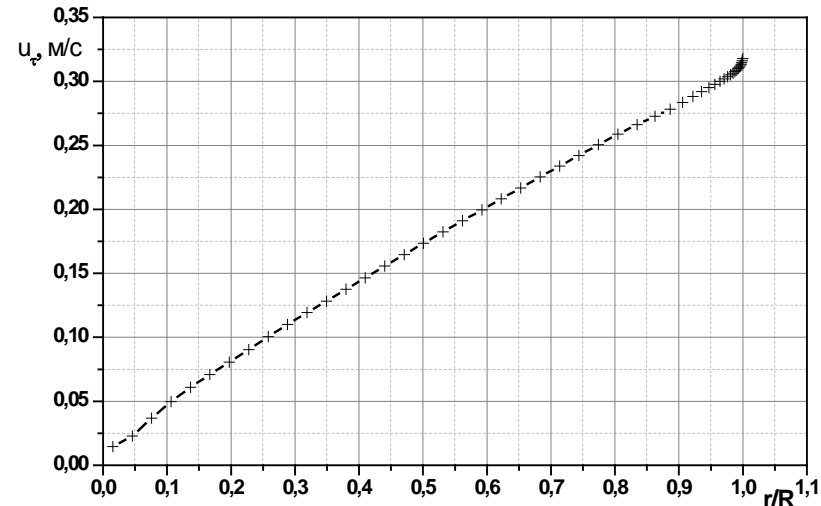


Соответствие чисел Рейнольдса для пластины Re_L и диска Re_R , обеспечивающих одинаковые значения динамической скорости на конце пластины и внешнем радиусе диска.

$$Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad Re_R = \frac{\omega R^2}{\nu},$$



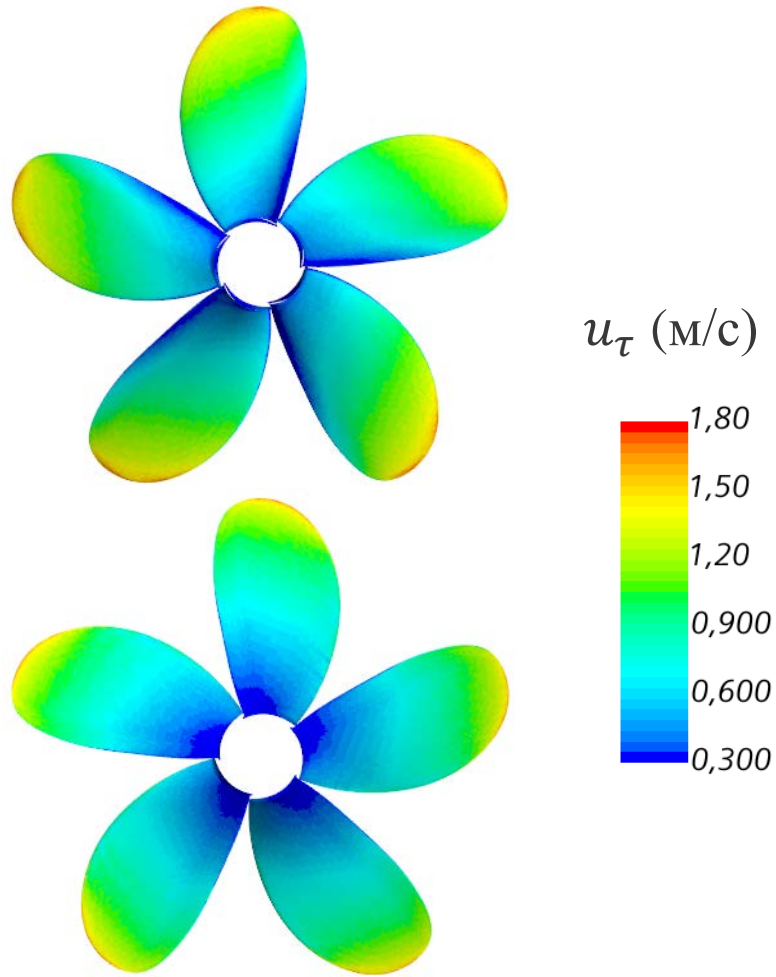
Распределение динамической скорости по шероховатой ($h=Rz=55$ мкм) поверхности корпуса судна при натурном числе Рейнольдса по длине ($Re_L=1.43 \cdot 10^9$). Окрашенная поверхность. Среднее $u_\tau = 0,28$ м/сек.



$u_\tau = 0,28$ м/сек.
Среднее на части диска, дающей 80% момента

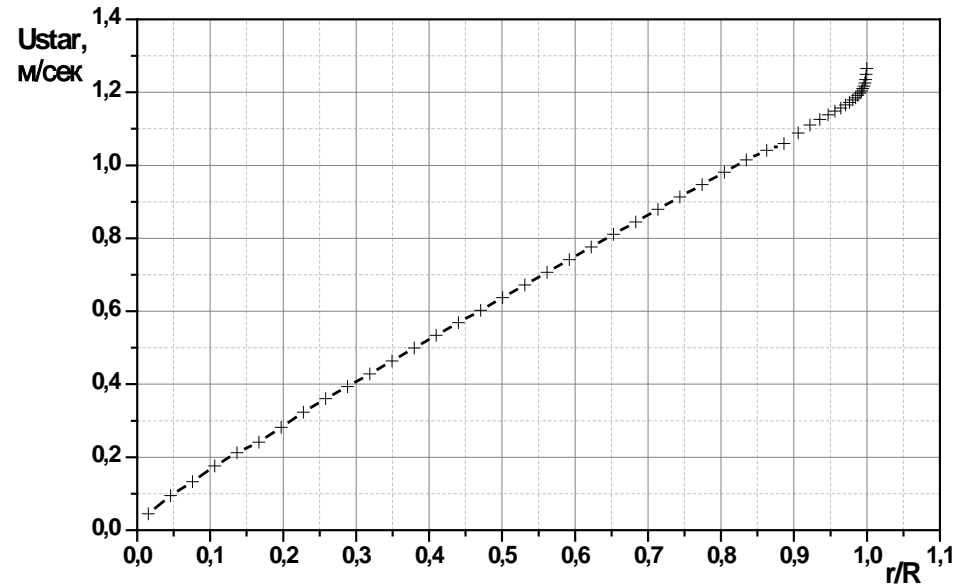
Распределение динамической скорости по поверхности окрашенного образца ($h=Rz=55$ мкм) при числе Рейнольдса по радиусу диска $Re_R=2 \cdot 10^6$ ($\lg Re_R=6,3$)

Распределение динамических скоростей для различных объектов



Распределение динамической скорости по поверхности гладкого гребного винта при натурном числе Рейнольдса

$$C_M = \frac{2M}{\rho\omega^2 R^5}, Re_R = \frac{\omega R^2}{\nu}.$$



Распределение динамической скорости по поверхности гладкого диска Рейнольдса $Re_R=2 \cdot 10^6$ ($\lg Re_R=6,9$)

$u_\tau=1,13$ м/сек. Среднее на части диска, дающей 80% момента.

Учет влияния шероховатости при численном моделировании

$$R^+ = \frac{r\rho u^*}{\mu}, \quad r - \text{высотный размер шероховатости}$$

$$f = 1 \quad R_{smooth}^+ \leq R^+ \quad (1.1)$$

$$f = \left[B \left(\frac{R^+ - R_{smooth}^+}{R_{rough}^+ - R_{smooth}^+} \right) + CR^+ \right]^a \quad (1.2)$$

$$R_{smooth}^+ < R^+ < R_{rough}^+$$

$$f = B + CR^+ \quad R^+ > R_{rough}^+ \quad (1.3)$$

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\log(R^+ / R_{smooth}^+)}{\log(R_{rough}^+ / R_{smooth}^+)} \right]$$

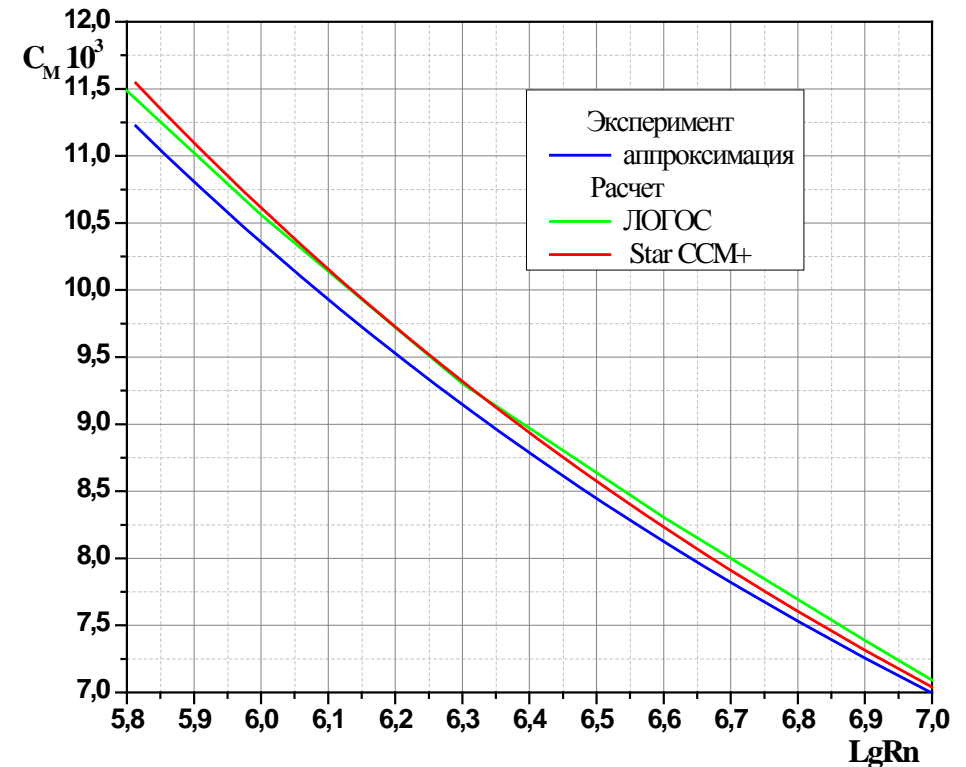
B, C, R_{smooth}^+ и R_{rough}^+ - константы.

По умолчанию $R_{smooth}^+ = 2,25; R_{rough}^+ = 90$.

$R^+ < R_{smooth}^+$ нет влияния шероховатости,
 $R^+ > R_{rough}^+$ полное проявление шероховатости,
 $R_{smooth}^+ < R^+ < R_{rough}^+$ частичное проявление.

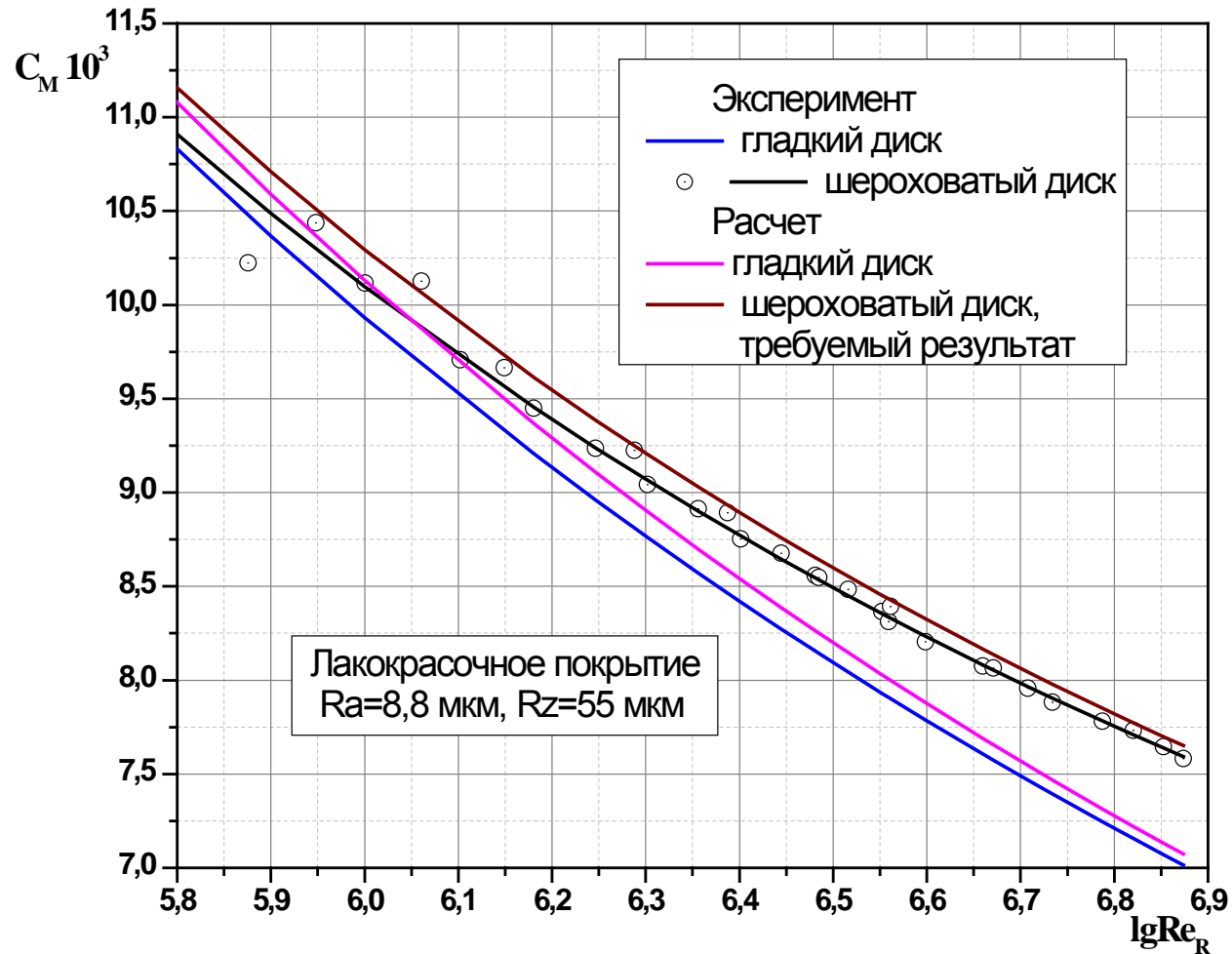
На погрешности учета влияния шероховатости влияют условия и погрешности как расчетного метода, так и эксперимента

Погрешности расчета для гладкого диска



Гладкий диск: эксперимент, ЛОГОС, Star CCM+

Учет влияния шероховатости при численном моделировании



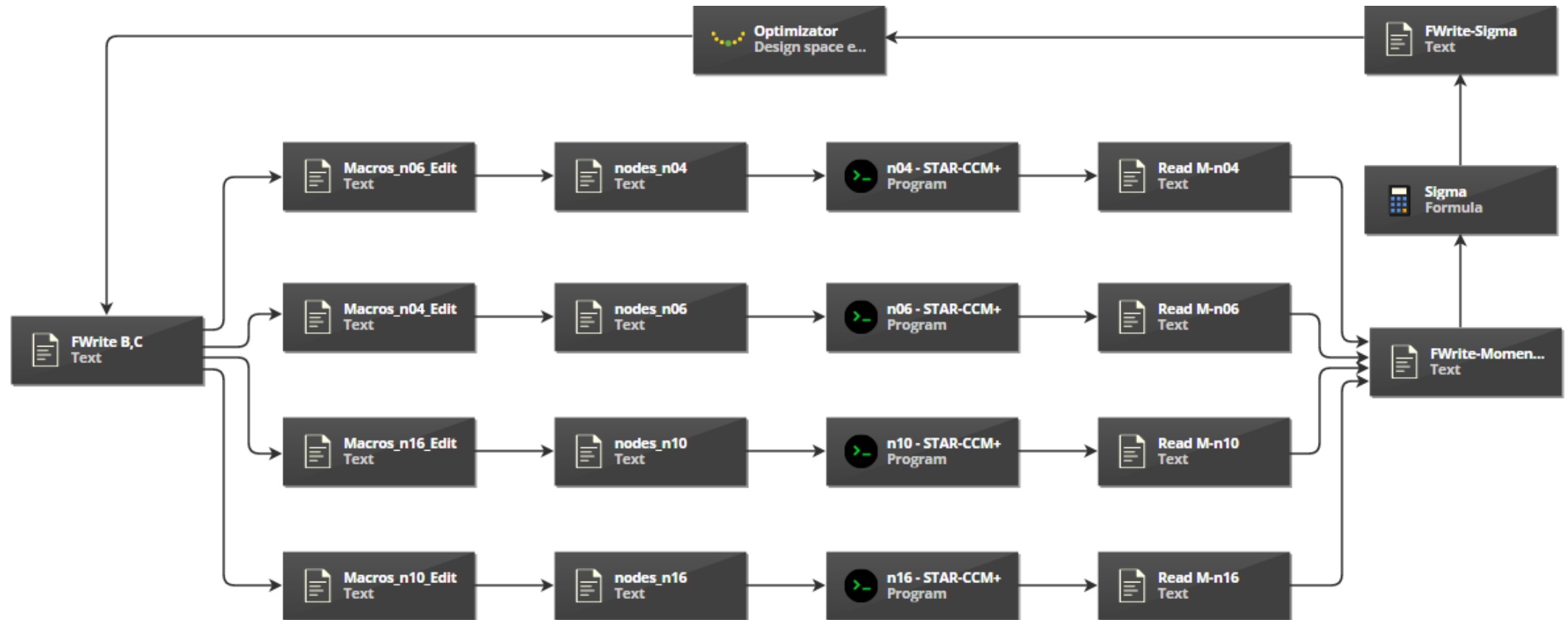
Гладкий и шероховатый диски (лакокрасочное покрытие). Эксперимент, расчет и требуемый результат

Из-за неполного соответствия расчета и эксперимента для оценки влияния шероховатости сопоставление с гладкой поверхностью должно вестись попарно. Эксперимент: гладкая поверхность – шероховатая поверхность; аналогично расчет: гладкая поверхность – шероховатая поверхность. Данную проблему представляется целесообразным решать следующим образом:

- определяются надбавки на шероховатость по отношению к испытаниям эталонного образца;
- полученные надбавки прибавляются к результатам расчета эталонного образца;
- по полученных зависимостям $C_M(Re_R)$ находятся коэффициенты функции шероховатости.

Нахождение коэффициентов функции шероховатости на основе экспериментальных данных

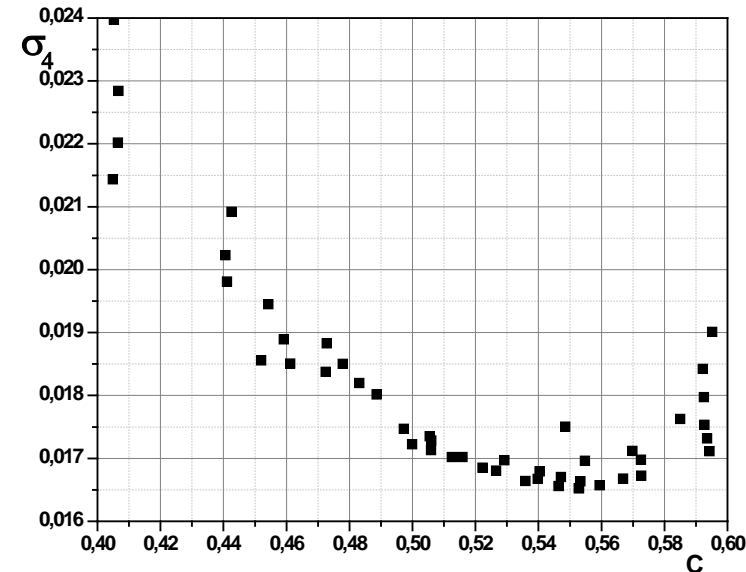
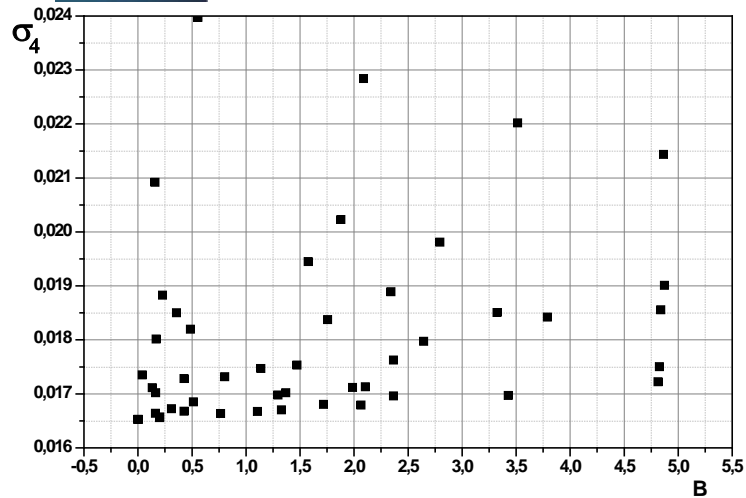
Блок-схема в ПО pSeven для поиска коэффициентов B, C шероховатого диска



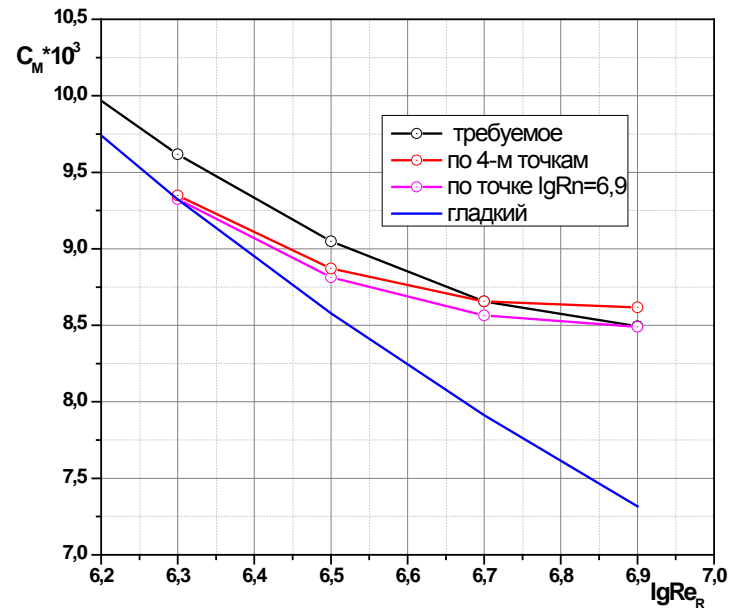
Пример для случая использования приближения расчетной кривой коэффициента момента к эксперименту по 4-м точкам

$$\sigma_n(B, C) = \sqrt{(C_M(Re_1)_{CFD} - C_M(Re_1)_{EXP})^2 + \dots + (C_M(Re_n)_{CFD} - C_M(Re_n)_{EXP})^2}$$

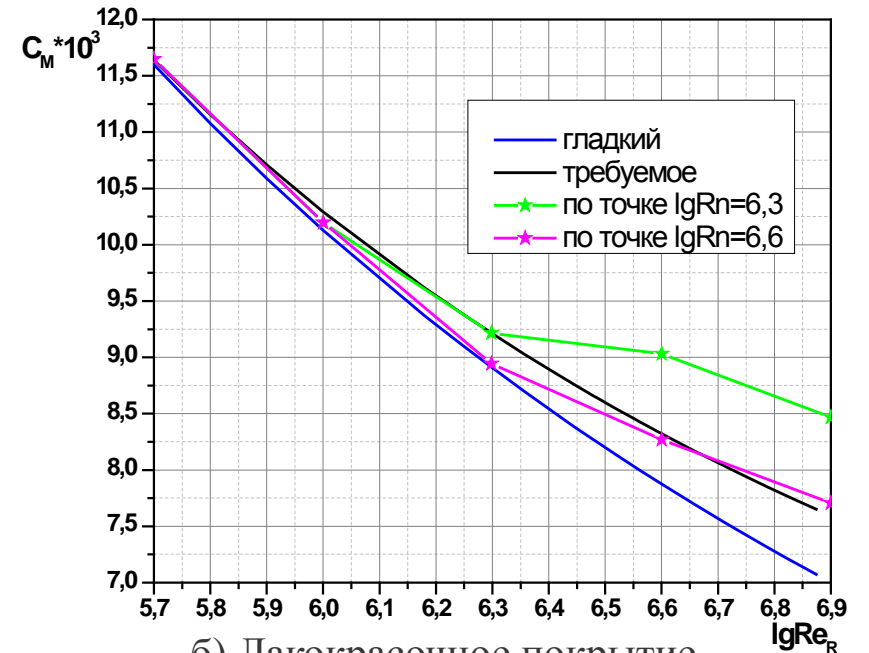
Нахождение коэффициентов функции шероховатости на основе экспериментальных данных



Зависимости σ_4 от коэффициентов функции шероховатости B и C



а) Риски шлифования в произвольном направлении



б) Лакокрасочное покрытие

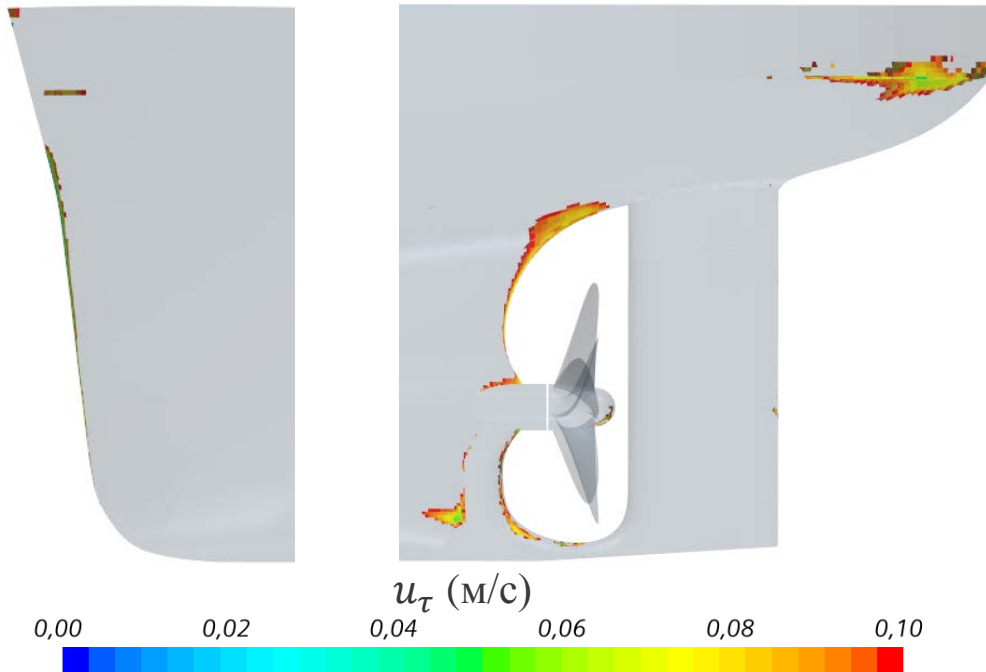
Расчет для шероховатого диска при различных коэффициентах функции шероховатости

Полученные результаты показывают, что якобы неавтомодельная функция шероховатости (1.2) на самом деле таковой не является. Однако для промышленных объектов с малым изменением динамической скорости по поверхности в принципе допустимо использование функции шероховатости в виде (1). Только коэффициенты функции шероховатости должны находиться на основе экспериментов с наиболее близким значением динамической скорости.

Корректировка функции шероховатости в рамках заложенного в Star-CCM+

Исключение «неавтомодельной» функции (1.2)

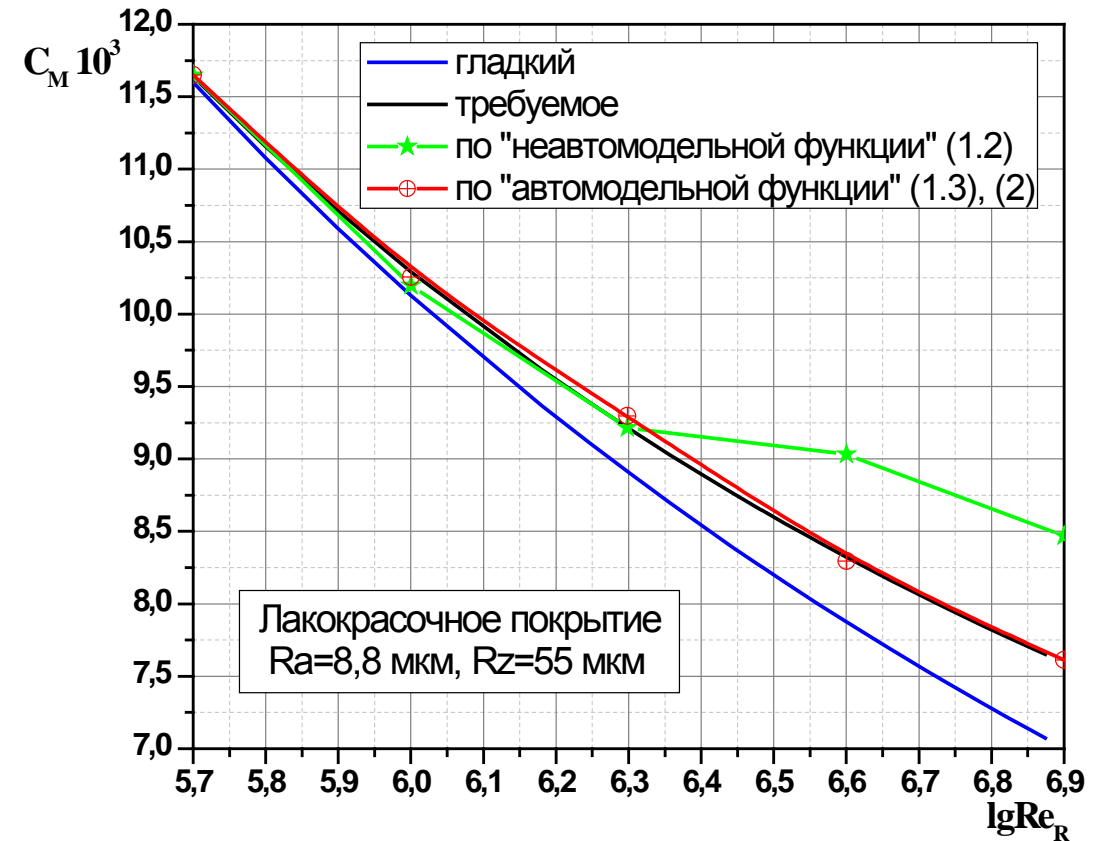
$$R_{smooth}^+ = 0,1; R_{rough}^+ = 1,0. (2)$$



Распределение динамической скорости в диапазоне $u_\tau < 0,1$ м/с по шероховатой поверхности корпуса судна ($Rz=70$ мкм) при натурном числе Рейнольдса ($Re=1.43 \cdot 10^9$)

Танкер «София» пр. 1552 скорость 17,06 узла

$R_{smooth}^+ = 1$ соответствует $u_\tau = 0,016$ м/с. Выведено $u_\tau < 0,1$ м/с, так как области с меньшими значениями не видны.

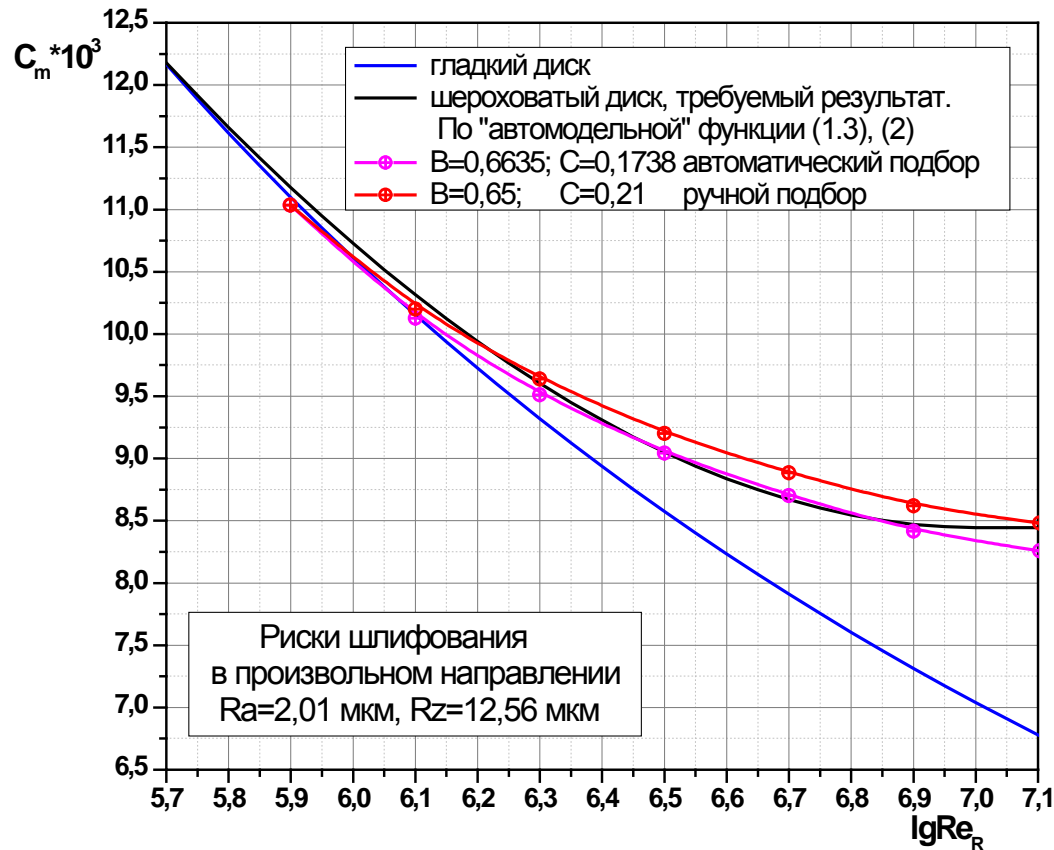


Расчет для окрашенного диска при различных коэффициентах функции шероховатости

Функция шероховатости $f=B+CR^+$ (1.3), условия (2):
 $B=0,8511$ и $C=0,0266$.

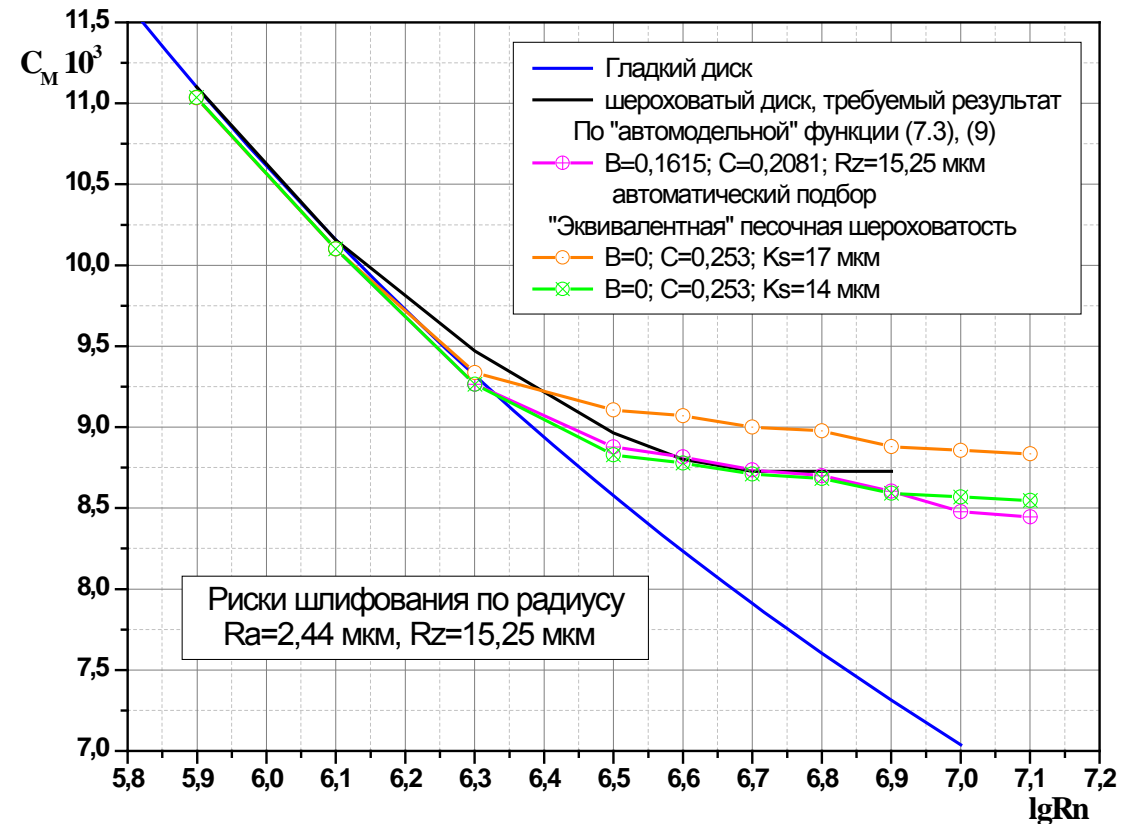
Найдено по 3-м точкам: $lg Re=6,3; 6,45; 6,6$
(одна целевая функция).

Функция шероховатости для шлифованных поверхностей



Расчет для шлифованного диска при различных коэффициентах функции шероховатости

Функция шероховатости (1.3), (2): $V=0,6635$ и $C=0,1738$
Найдено по 2-м точкам: $\lg Re=6,7$; $6,9$ с минимизацией СКО для каждой точки (две целевые функции).



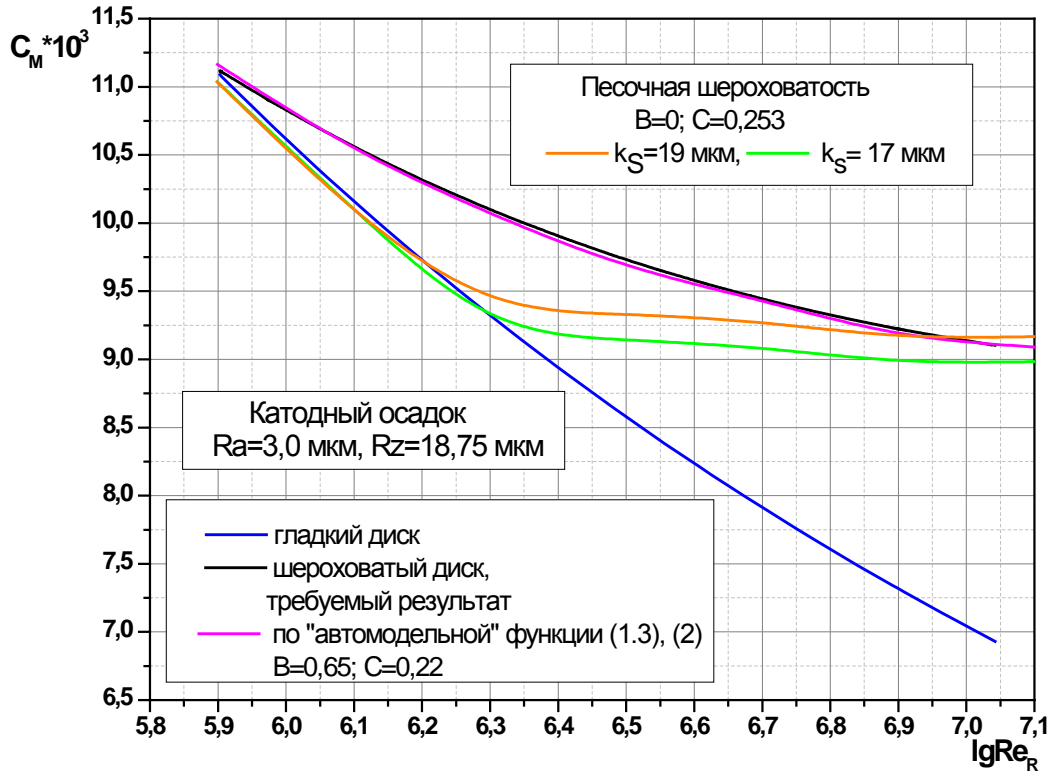
В Star CCM+ «песочная шероховатость»: $V=0$; $C=0,253$.

По Л.А. Дорфману в режиме полного проявления шероховатости:

$$C_M = 0,108 \cdot \left(\frac{K_S}{R}\right)^{0,272} \Rightarrow k_s = R \cdot \exp\left(3,676 \cdot \ln\left(\frac{C_M}{0,108}\right)\right)$$

Для получившегося $k_s=17$ мкм результат при $\lg Re > 6,4$ завышен.

Функция шероховатости для катодного осадка. Выводы по Star CCM+.



Расчет для диска покрытого катодным осадком при различных коэффициентах функции шероховатости

Предлагаемая в Star CCM+ для неавтомодельного (частичного) случая проявления шероховатости функция шероховатости (1.2) не работает для технологической шероховатости.

Функция шероховатости

$$f = B + CR^+ \quad (1.3)$$

при

$$R_{smooth}^+ = 0,1; R_{rough}^+ = 1,0. \quad (2)$$

для шероховатости в режиме частичного проявления (неавтомодельная шероховатость) обеспечивает получение достаточно точного результата.

В случае быстрого перехода от неавтомодельного режима к автомодельному (режиму полного проявления шероховатости) погрешности при учете шероховатости возрастают. Использование возможно, но требуется нахождения коэффициентов B и C при наиболее близком к реальному значению динамической скорости u_τ , точнее числу Рейнольдса по высоте шероховатости $h^+ = \frac{hu_\tau}{\nu}$.

Предлагаемая функция шероховатости

Более 40 лет назад в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова был предложен метод нахождения более общей функции шероховатости на основе результатов экспериментов по испытаниям вращающихся шероховатых дисков. Однако, во-первых, указанный метод был основан на использовании интегрального метода расчета пограничного слоя с довольно сильными допущениями, а во-вторых он применялся тогда только для лакокрасочных покрытий. В используемых в технической документации по Star CCM+, ЛОГОС и в настоящей работе терминах функция шероховатости может быть представлена в виде:

$$f = 1 \text{ при } f < 1 \text{ по (3.2),} \quad (3.1)$$

$$f = 1 + C_1 \cdot R^+ + C_2 \cdot R^+ \cdot \exp(-C_3 \cdot R^+). \quad (3.2)$$

В 90-е предлагаемая функция была включена в собственный код, реализующий решение уравнений Рейнольдса конечно-объемным методом. Однако коэффициенты требовалось подбирать вручную.

Предлагаемый метод нахождения коэффициентов в функции шероховатости на основе оптимизационной процедуры позволяет находить их для любого вида шероховатости при наличии измерений момента сопротивления вращению круглых дисков. Метод пригоден для любого программного продукта, для которого известен вид функции шероховатости, доступны коэффициенты этой функции и существует возможность автоматизации выполнения расчетов.



Крыловский
государственный
научный центр

Спасибо за внимание!