Проверка функции MFSeal в Mathcad
PS - практически плоская щель
(отсутствие конусности и волнистости)

В данном примере проверяется работоспособность расчётного модуля и функции MFSeal библиотеки MSL (написанной на языке программирования C++ для Mathcad), предназначенного для численного решения уравнения Рейнольдса [применительно к торцовому уплотнению вала] с помощью бессеточного метода МКМ. Функция MFSeal в Mathcad применима для колец пары трения с параллельной, конфузорной или диффузорной щелью с учётом волнистости рабочей поверхности [смешанное трение].

Подробнее о бессеточном методе расчёта уравнения Рейнольдса:
https://www.highexpert.ru/publications/ms_meshless_rbf_method.html

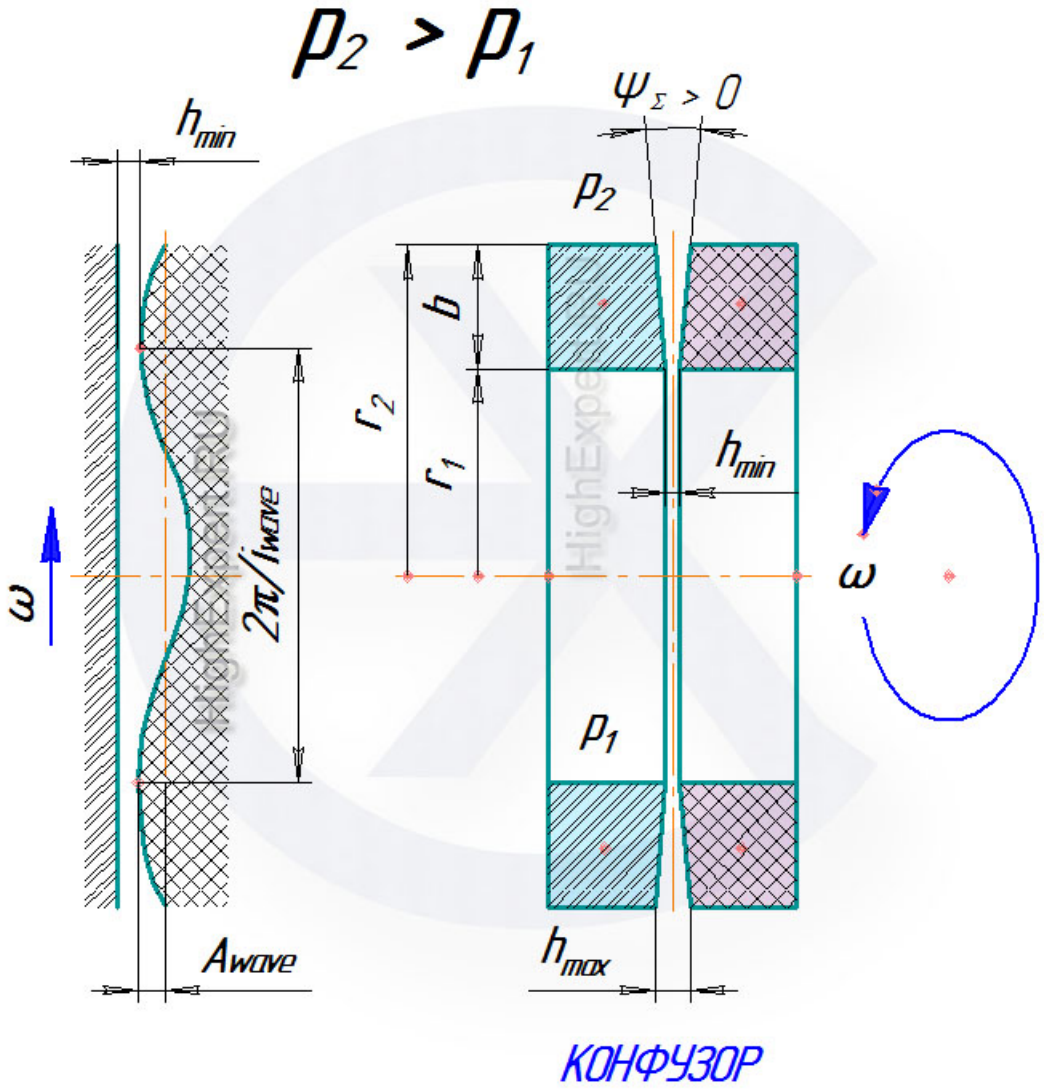


Рисунок. Расчётная схема колец пары трения торцового уплотнения.

Исходные данные [1]

$r_1 := 4.826$ см - внутреннний радиус рабочей поверхности торцового уплотнения

$r_2 := 5.304$ см - наружный радиус рабочей поверхности торцового уплотнения

$D_1 := 2 \cdot r_1$

$D_1 = 9.652$ см - внутреннний диаметр рабочей поверхности торцового уплотнения

$D_2 := 2 \cdot r_2$

$D_2 = 10.608$ см - наружный диаметр рабочей поверхности торцового уплотнения

$b := r_2 - r_1$

$b = 0.478$ см - ширина рабочего пояска пары трения в торцовом уплотнении

$S_c := \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_2^{\,2} - D_1^{\,2} \right)$

$S_c = 15.212$ см^2 - номинальная площадь рабочего пояска колец пары трения торцового уплотнения

$i_{wave} := 0$ - количество волн на рабочей поверхности пары трения [0, 2 или 3... произвольно]

$A_{wave} := 0.0$ мкм - амплитуда волнистости рабочей поверхности пары трения [0 мкм, 0.1 мкм ... произвольно до ~ 3.0 мкм]

$\psi_\Sigma := 0.001 \cdot 10^{-4}$ - угол наклона (конусности рабочих поверхностей колец пары трения)
[= 0 - плоскопараллельная щель,
> 0 - конфузорная щель,
< 0 - диффузорная щель]

$K_{Seal} := 0.75$ - коэффициент гидравлической нагрузки торцового уплотнения

$p_2 := 3.55 \cdot 10^6$ Па - абсолютное давление рабочей жидкости со стороны наружного диаметра (радиуса) на торцовом уплотнении

$p_2 := p_2 \cdot \left(9.81 \cdot 10^4\right)^{-1}$

$p_2 = 36.188 \ \frac{кгс}{см^2}$ - абсолютное давление со стороны наружного диаметра (радиуса) на торцовом уплотнении

$p_1 := 0.101 \cdot 10^6$ Па - абсолютное давление со стороны внутреннего диаметра (радиуса)на торцовом уплотнении

$p_1 := p_1 \cdot \left(9.81 \cdot 10^4\right)^{-1}$

$p_1 = 1.0296 \ \frac{кгс}{см^2}$ - абсолютное давление со стороны внутреннего диаметра (радиуса)на торцовом уплотнении (атмосфера)

$\Delta p := p_2 - p_1$

$\Delta p = 35.158 \ \frac{кгс}{см^2}$ - перепад давления на торцовом уплотнении

$p_{spring} := 0.207 \cdot 10^6$ Па - начальное контактное давление в паре трения, создаваемое пружиной сжатия

$p_{spring} := p_{spring} \cdot \left(9.81 \cdot 10^4\right)^{-1}$

$p_{spring} = 2.11 \ \frac{кгс}{см^2}$ - начальное контактное давление в паре трения, создаваемое пружиной сжатия

$F_{spring} := p_{spring} \cdot S_c$

$F_{spring} = 32.1$ кгс - рабочее усилие пружины сжатия

$n := 1800 \ \frac{об}{мин}$ - скорость вращения вала

$\omega := \pi \cdot \frac{n}{30}$

$\omega = 188.5 \ \frac{1}{с}$ - угловая скорость вращения вала

$t_{f_mid} := 38$ градусов Цельсия - температура рабочей жидкости (воды) в зазоре пары трения

$f_{dry} := 0.2$ - коэффициент сухого трения при механическом контакте

$iMContact := 0$ - параметр оценки осевой силы механического контакта (контактная модель):
0 - по предположению Lebeck (норм. распределение)
1 - Brunetiere 2010 (exp распределение)
2 - Brunetiere & Francisco 2019 (exp распределение)
3 - Cochain & Burnetiere 2019 (exp распределение)
4 - G&W (Нормальное Гауссовское распределение)

$h_{min} := 0.1$ мкм - начальное приближение минимального зазора в паре трения
(поиск hmin из баланса осевых сил проводится при hmin = 0...0.1 мкм)

$i_{RBF} := 2$ - номер применяемой радиальной базисной функции RBF:

0 - обощённая мультиквадратичная GMQ
[q = 3/2, c = 0.0005]
1 - обобщённая сплайна тонких пластин GTPS
[q = 3(4), c = 1]
2 - полигармоническая PHS
[q = 2(3), c = 1]

$$q := if\left(i_{RBF} = 0, \frac{3}{2}, if\left(i_{RBF} = 1, 3, 2\right)\right)$$

$$c := if\left(i_{RBF} = 0, 0.0005, 1.0\right)$$

$q = 2$ $c = 1$ - коэффициенты для RBF [2]

$m_P := 1$ - полиномы для уточнения аппроксимации
0 - P0 - полиномы не используются
1 - P1 = a0
3 - P2 = a0 + a1*x + a2*y
4 - P3 = a0 + a1*x + a2*y + a3*x*y
5 - P4 = ... + a4*x*x
6 - P5 = ... + a5*y*y
(5 и 6 - эксперимент)

$WM_D_2 := 2$ - тип рабочей жидкости со стороны наружного радиуса r2 (диаметра D2):
2 - вода
7 - масло моторное М14 (эксперимент)

Со стороны внутреннего радиуса r1 (диаметра D1) - атмосфера (воздух).

Материалы колец пары трения MR и MS:

1 - Q(SIC) реакционно-спечённый карбид кремния
2 - U(WC/TC Ni-binder) карбид вольфрама на никелевой связке
3 - Q1 (SSIC) карбид кремния без свободного кремния (чистый)
4 - A (Carbon antimony Imp.) углеграфит с пропиткой сурьмой
5 - B (Carbon furan resin Imp.) углеграфит с пропиткой смолами
6 - Q3 (SIC+C / SIC30) композиция карбида кремния со свободным графитом
7 - V (Al2O3) керамика на основе оксида алюминия
8 - F/G (S304 / S316) аустенитная нержавеющая сталь
9 - Графит НАМИ ТС-ТАФ-40
10 - 30Х13 мартенситная нержавеющая закалённая сталь
11 - композиция силикокарбид кремния TiC-SiC (Ti3SiC2)
12 - нитрид кремния Si3N3

$MR := 1$ - материал вращающегося кольца

$MS := 1$ - материал неподвижного кольца (контркольца)

Функция Re_MKM_MFSeal_SimpleTest() библиотеки MSL для Mathcad

$MS := Re_MKM_MFSeal_SimpleTest\left(M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M\right.$

Чтение результатов из матрицы...

$MS =$

	0	1	2
0	1	4.826	38
1	60	4.834102	38
2	180	4.842203	38
3	0.345503	4.850305	38
4	0.345981	4.858407	38
5	140.145646	4.866508	38
6	140.145646	4.87461	38
7	14.706666	4.882712	38
8	14.789288	4.890814	38
9	15.212031	4.898915	38

$N_{SubDomains} := \left(MS^{<0>}\right)_0$

$r_{Seal} := \left(MS^{<1>}\right)$

$NUG_{x_Seal} := \left(MS^{<0>}\right)_1$

$NUG_{y_Seal} := \left(MS^{<0>}\right)_2$

$h_1 := \left(MS^{<0>}\right)_3$

$h_2 := \left(MS^{<0>}\right)_4$

$h_{max} := \left(MS^{<0>}\right)_{40}$

$h_{mid} := \left(MS^{<0>}\right)_{41}$

Создадим матрицу для построяния поля давлений

$i_s := 0 .. NUG_{x_Seal} - 1$ $\qquad$ $j_s := 0 .. NUG_{y_Seal} - 1$

$Mp_{Seal_{i_s, j_s}} := MS_{i_s, j_s} + 7$

$Mp_{Seal_bar_{i_s, j_s}} := Mp_{Seal_{i_s, j_s}} \cdot \frac{9.81}{10}$

$DI_{p_r_Seal} := \left(MS^{<0>}\right)_5$

$$Mp_{Seal_bar_field_{i_s}, j_s} := Mp_{Seal_bar_{i_s}, NUG_{y_Seal} - 1 - j_s}$$

$Mp_{Seal} =$

	0	1	2
0	1.02956	1.02956	1.02956
1	1.62668	1.62817	1.62998
2	2.22375	2.22652	2.22975
3	2.82079	2.82465	2.82907
4	3.41776	3.42262	3.42812
5	4.01471	4.02055	4.02706
6	4.61162	4.61833	4.62577
7	5.20851	5.2162	5.22461
8	5.80529	5.81379	5.82303
9	6.40208	6.41139	6.42144

Результаты расчета всего домена (уплотнения) [MFSeal в Mathcad]

$D_1 = 9.652$ см - внутреннний диаметр рабочей поверхности торцового уплотнения

$D_2 = 10.608$ см - наружный диаметр рабочей поверхности торцового уплотнения

$n := 1800 \ \frac{об}{мин}$ - скорость вращения вала

$\Delta p = 35.158 \ \frac{кгс}{см^2}$ - перепад давления на торцовом уплотнении

$t_{f_mid} := 38$ градусов Цельсия - температура рабочей жидкости (воды) в зазоре пары трения

$N_{SubDomains} = 1$ шт. - количество простых субдоменов

$h_{min} = 0.3455$ мкм - минимальный зазор в паре трения

$h_{max} = 0.346$ мкм - максимальный зазор в паре трения

$i_{wave} = 0$ шт. - количество волн на рабочей поверхности

$A_{wave} = 0$ мкм - амплитуда волн на рабочей поверхности

$a_{f_Seal} = 0.525$ - коэффициент распределения полного давления для всего домена

$p_{f_mid_Seal} = 18.45 \ \frac{кгс}{см^2}$ - среднее давление рабочей жидкости в зазоре пары трения всего домена

$p_c = 10.12 \ \frac{кгс}{см^2}$ - контактное давление в паре трения торцового уплотнения (механический контакт)

$v_{mid} = 9.55 \quad \frac{м}{с}$ - скорость скольжения на среднем радиусе

$W_{f_hmin} = 280.29$ кгс - несущая способность смазочного слоя по всему домену

$\frac{h_{min}}{3 \cdot \sigma_{RMS}} = 0.99964$ - критерий режима работы торцового уплотнения:
> 1 - жидкостное трение
< 1 - смешанное трение

$W_{closing} = 433.22$ кгс - усилие прижимающее кольца пары трения друг к другу (от перепада давления рабочей жидкости и рабочего усилия пружины сжатия)

Баланс сил в торцовом уплотнении [смешанное трение]

$W_{closing} - \left(W_{f_hmin} + W_m\right) = -1.024$ кгс

$\frac{W_{closing} - \left(W_{f_hmin} + W_m\right)}{W_{closing}} = -0.236 \cdot \%$? < ? 0.5%

Осевая сила от воздействия перепада давления при механическом контакте колец пары трения

$W_{difference} := W_{closing} - W_{f_hmin}$

$W_m := if\left(W_{closing} - W_{f_s_Seal} < 0, 0, \left|W_{difference}\right|\right)$

$W_m = 152.926$ кгс - значение силы при механическом контакте колец пары трения

$F_m = 30.79$ кгс - окружное усилие трения скольжения при механическом контактке колец пары трения

$f_{dry} = 0.2$ - коэффициент сухого трения

$f_f = 0.0067$ - коэффициент жидкостного трения

$f_{fm} = 0.0778$ - коэффициент трения в торцовом уплотнении

Фактор нагрузки торцового уплотнения

$G_{Seal} = 7.289 \cdot 10^{-9}$? > ? 1.0e-8

Момент жидкостного трения

$M_{f_s_r_mid_Seal} = 14.79$ кгс · см

Окружная сила жидкостного трения

$F_{f_s_r_mid_Seal} = 2.92$ кгс

Мощность жидкостного трения

$Q_{Seal_F_fm} = 3157.2$ Вт

Мощность трения при механическом контакте

$Q_{Seal_p_c} = 1120.8$ Вт

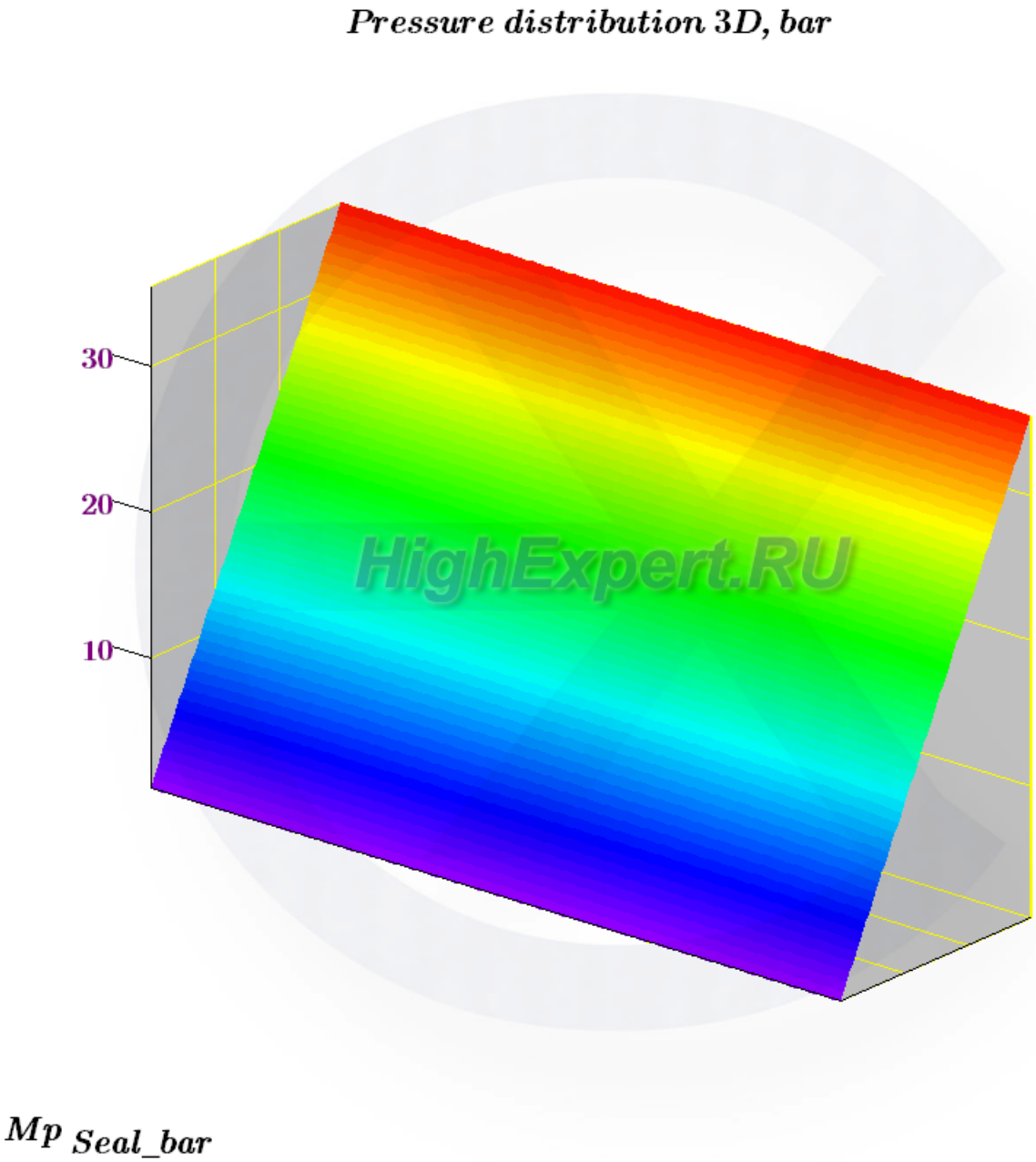
Полная мощность трения в торцовом уплотнении

$Q_{Seal_F_fm} = 3157.2$ Вт

Утечка рабочей жидкости на среднем радиусе пары трения

$U_{f_s_r_mid_Seal} = 4.194$ $\frac{см^3}{час}$

Распределение абсолютного давления рабочей жидкости в зазоре пары трения торцового уплотнения



Сравнение параметров, рассчитанных с применением функции MFSeal со значениями, полученными по известным аналитическим зависимостям [1, 6, 7]

Несущая способность смазочного слоя рабочей жидкости

$W_{f_hmin} = 280.3$ кгс - по бессеточному методу

$W_{f_analitycal}(h_{min}) = 267.6$ кгс - по известной формуле

Разница по несущей способности смазочного слоя

$$\frac{\left(W_{f_hmin} - W_{f_analitycal}(h_{min})\right)}{W_{f_analitycal}(h_{min})} = 4.744 \cdot \%$$

В работе [6] приведена обощённая аналитическая зависимость для расчёта оценочной величины несущей способнсти смазочного слоя торцового уплотнения [для жидкостного трения]

$W_{f_\psi_wave}(h_{min}) = 275.887$ кгс

Расхождение между расчётной несущей способностью смазочного слоя рабочей жидкости и полученным значением по аналитической формуле [6]

$$\frac{W_{f_hmin} - W_{f_\psi_wave}(h_{min})}{W_{f_\psi_wave}(h_{min})} = 1.6 \cdot \%$$

Момент жидкостного трения смазочного слоя рабочей жидкости

$M_{f_s_r_mid_Seal} = 14.79$ кгс · см - по бессеточному методу

$M_{f_analitycal}(h_{min}) = 14.722$ кгс · см - по известной формуле

Окружная сила жидкостного трения

$F_{f_s_r_mid_Seal} = 2.92$ кгс - по бессеточному методу

$F_{f_analitycal}(h_{min}) = 2.907$ кгс - по известной формуле

Разница по моменту жидкостного трения смазочного слоя

$$\frac{\left(M_{f_s_r_mid_Seal} - M_{f_analitycal}(h_{min})\right)}{M_{f_analitycal}(h_{min})} = 0.458 \cdot \%$$

Ориентировочная величина утечки рабочей жидкости через пары трения торцового уплотнения

$U_{f_s_r_mid_Seal} = 4.19$ $\frac{см^3}{час}$ - по бессеточному методу

$U_{f_analitycal}(h_{min}) = 4.194$ $\frac{см^3}{час}$ - по известной формуле

Разница по утечке рабочей жидкости

$$\frac{U_{f_s_r_mid_Seal} - U_{f_analitycal}(h_{min})}{U_{f_analitycal}(h_{min})} = -3.82 \cdot 10^{-3} \cdot \%$$

В работе [6] приведена обощённая аналитическая зависимость для расчёта величины утечки через торцовое уплотнение [для жидкостного трения]

$U_{f_\psi_wave_Seal} = 4.19$ $\frac{см^3}{час}$

Расхождение между расчётной утечкой рабочей жидкости и полученным значением по аналитической формуле [6]

$$\frac{U_{f_s_r_mid_Seal} - U_{f_\psi_wave_Seal}}{U_{f_\psi_wave_Seal}} = 0.07 \cdot \%$$

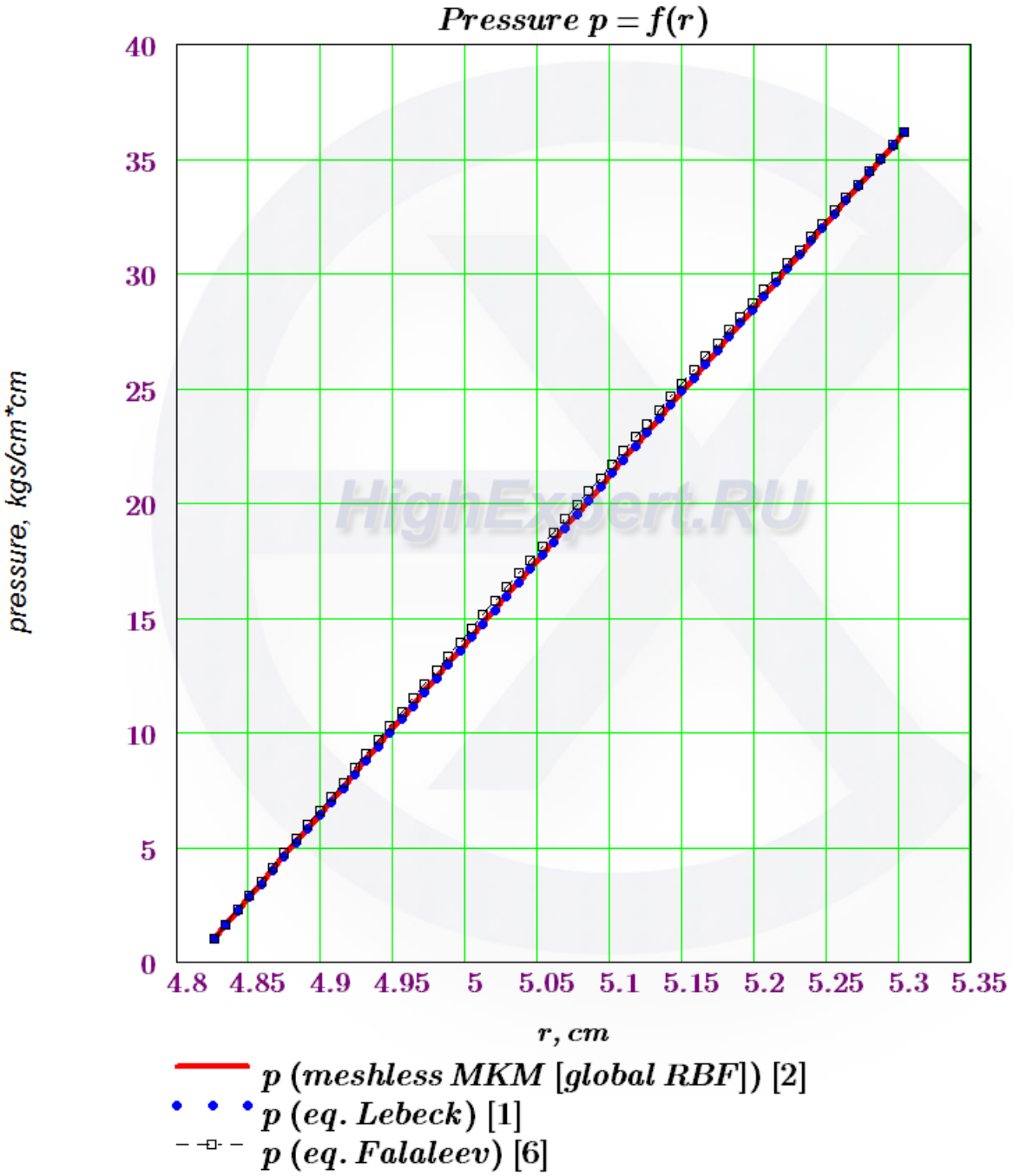
Полная мощность трения = мощности при смешанном трении

$Q_{Wclosing} = 3157.2$ Вт ? = ? $Q_{Seal_F_fm} = 3157.2$ Вт

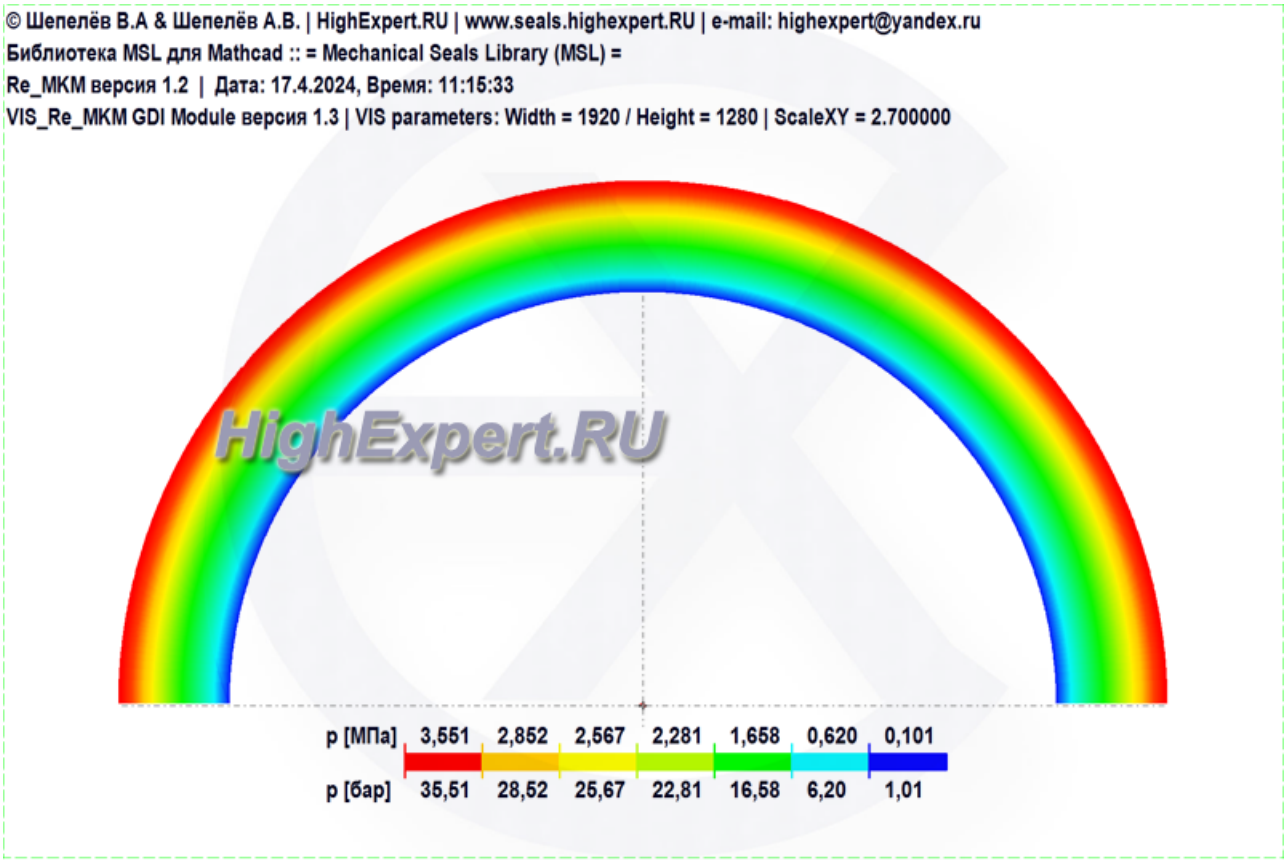
Расхождение по полной мощности трения

$$\frac{Q_{Seal_F_fm} - Q_{Wclosing}}{Q_{Wclosing}} = -1.44 \cdot 10^{-14} \cdot \%$$

Изменение абсолютного давления рабочей жидкости в зазоре пары трения торцового уплотнения в радиальном направлении [только для осесимметричной задачи (без волнистости)]



Распределение абсолютного давления рабочей жидкости в зазоре пары трения торцового уплотнения (направление взгляда на рабочую поверхность [осесимметричная задача (без волнистости)])



$h_{min} = 0.3455$ *мкм* *- минимальный зазор в паре трения*

$h_{max} = 0.346$ *мкм* *- максимальный зазор в паре трения*

$\frac{h_{max}}{h_{min}} = 1.001$ *- отношение максимального зазора в паре трения к минимальному зазору*

Литература

1. Lebeck A.O. Principles and Design of Mechanical Face Seals, Wiley-Interscience; 1st edition, 1991, 800 p.

2. Бессеточный метод на основе радиальных базисных функций для численного решения уравнения Рейнольдса применительно к торцовому уплотнению вала, https://www.highexpert.ru/publications/ms_meshless_rbf_method.html

3. Физические свойства воды, https://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html

4. Физические свойства моторного масла М14Г2ЦС, https://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html

5. Vapour pressure of water, https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water

6. Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования: Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ, 1998. - 276 с.

7. Мельник В.А. Торцовые уплотнения валов: Справочник. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.