**2. Теоретические исследования методов расчета на устойчивость штоков цилиндров**

2.1 Обзор существующих методов расчета гидроцилиндров

Метод расчета штоков гидроцилиндров на устойчивость зависит от компоновки гидроцилиндра, от вида закрепления на концах. Худшим является случай, когда цилиндр укреплен на машине шарнирно, т. е. имеет проушины у задней головки и на штоке.

Такой гидроцилиндр может быть подвержен нагружению по следующим схемам:

1) эксцентричные продольные сжимающие нагрузки и поперечная сила;

2) только эксцентричные продольные сжимающие нагрузки;

3) центральные продольные сжимающие нагрузки и поперечная сила;

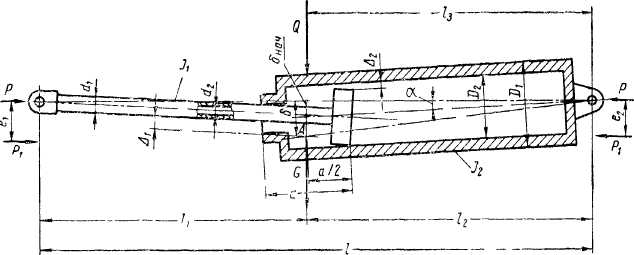


Рис 102 Схема нагружения силовою гидроцилиндра

4) только центральные продольные сжимающие нагрузки. Первая схема нагружения гидроцилиндра показана на рис. 102.

На практике наиболее часто встречаются схемы нагружения 2 и 4. Условные обозначения на схеме рис. 102:

— расстояние от головки штока гидроцилиндра до точки А в см;

— расстояние от переходной точки А до шарнира корпуса гидроцилиндра в см;

— длина гидроцилиндра в рабочем положении в см;

— расстояние о г начала передней направляющей штока до конца поршня в см;

— зазор на диаметр в направляющих инока в см (табл. 35);

- зазор на диаметр между поршнем и цилиндром в см (табл. 35);

и — моменты инерции сечения на длинах и в см4

— начальный прогиб гидроцилиндра в см;

— наибольшая рабочая продольная нагрузка в кГ;

, — эксцентриситет продольной силы относительно оси цилиндра и относительно оси штока;

— расстояние от головки штока гидроцилиндра до места наибольшего прогиба под нагрузкой в см;

— наибольший прогиб домкрата под нагрузкой в см;

— поперечная сила в кГ;

— расстояние от точки приложения поперечной силы до шарнира цилиндра в см,

— вес гидроцилиндра в кГ;

— угол между осью гидроцилиндра и горизонтальной плоскостью в радианах.

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Отверстия | Валы | Номинальные диаметры в *мм* | | | | | | | |
|  |  | 18-30 | 39-50 | 50-80 | 80-120 | 120-150 | 150-180 | | 180-220 | 220-260 | 260-310 |
| ***А*** | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,00535  0,0101  0,0176  0,0283  0,0122 | 0,00640  0,0114  0,0207  0,0344  0,0504 | 0,00720  0,0135  0,0247  0,0420  0,0602 | 0,00833  0,0158  0,0288  0,0464  0,0702 | 0,00964  0,0180  0,0340  0,0524  0,0802 | 0,00964  0,0180  0,0340  0,0524  0,0802 | 0,0108  0,0200  0,0100  0,0606  0,0904 | 0,0108  0,0200  0,0400  0,0606  0,0904 | | 0,0122  0,0224  0,0460  0,0686  0,100 |  |  |
| ***A3*** | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,0094  0,0128  0,0192  0,0294  0,0428 | 0,0106  0,0142  0,0224  0,0354  0,0510 | 0,0127  0,0170  0,0268  0,0418  0,0610 | 0,0148  0,0198  0,0313  0,0480  0,0712 | 0,0168  0,0229  0,0366  0,0544  0,0810 | 0,0168  0,0229  0,0363  0,0544  0,0816 | 0,0i00  0,0251  0,0130  0,0626  0,0916 | 0,0190  0, 0251  0,0430  0,0626  0,0916 | | 0,0212  0,0282  0,0192  0,0708  0,102 |  |  |
| ***А*** | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,0282  0,0291  0,0328  0,0396  0,0504 | 0,0346  0,0354  0,0394  0,0480  0,0604 | 0,0402  0,0414  0,0466  0,0564  0,0720 | 0,0462  0,0480  0,0538  0,0650  0,0836 | 0,0522  0,0544  0,0616  0,0734  0,0955 | 0,0522  0,0544  0,0616  0,0734  0,0955 | 0,0602  0,0626  0,0716  0,0856  0,108 | 0,0602  0,0626  0,0716  0,0856  0,108 | | 0,0684  0,0708  0,0814  0,0960  0,121 |  |  |

Расчет гидроцилиндра на прочность и устойчивость включает в себя определение величины критической сжимающей силы и наибольшего напряжения от сжатия и изгиба при рабочей нагрузке

Критическая сила определяется из уравнения

Наибольшее напряжение от сжатия и изгиба при рабочей нагрузке

В расчетных формулах принято, что основные детали гидро­цилиндра изготовлены из стали (кГ/см2), имеют круглое сечение и наибольший прогиб гидроцилиндра под нагрузкой происходит на границе длин и ().

**Расчет гидроцилиндра на устойчивость**

Критическая сила определяется по формуле

(рассчитывается цилиндр при выдвинутом штоке).

Значение определяется из графиков рис. 103-110

Для значений и не вошедших в соответствующий график, следует производить интерполяцию.

где и — момент инерции сплошного сечения с диаметром равным соответственно наружному и внутреннему диаметру, в см4.

**Расчет штока на прочность**

Наибольшее напряжение от сжатия и изгиба определяется по формуле (24), где площадь расчетного сечения штока в см2;

— площадь круглого сплошного сечения с наружным диаметром в см2 (см. табл. 36):

— момент сопротивления сечения штока в см3;

— момент сопротивления круглого сплошного сечения в см3 (см. табл. 36);

— коэффициенты ослабления сечения концентричным продольным отверстием (определяются по табл. 37).

Условие применимости данной методики

**Определение прогибов**

Полный прогиб определяется.

где — диаметр штока;

при

где — диаметр штока,

при

Наибольший прогиб определяется в зависимости от схемы нагружения.

Схема 1:

Схема 2.

Схема 3'

Схема 4:

(основные условные обозначения даны к схеме рис. 102).

После определения наибольшего напряжения от сжатия и изгиба по формуле (24) определяется запас прочности по пределу текучести

Условие применимости вышеизложенной методики расчета на прочность и устойчивость

Согласно рекомендуемому ряду максимальный ход

Если гидроцилиндры выбраны с максимальным ходом, то дан­ная методика может оказаться неприменимой. В этом случае рекомендуется рассчитывать шток на продольный изгиб.

Рассматриваем шток как гибкий стержень, нагруженный про­дольной сжимающей нагрузкой. Если цилиндр и шток снабжен проушинами, то нагрузка действует по продольной оси штока.

Критическая сила выражается формулой Эйлера:

где — коэффициент устойчивости;

— коэффициент приведенной длины.

Условие применимости формулы Эйлера:

где — предел пропорциональности для материала стержня;

Если для выбранного гидроцилиндра формула Эйлера не при­менима, расчет ведем по формуле Ясинского:

где а и b — коэффициенты (см. табл. 38).

При расчете сжатых стержней условие прочности и условие устойчивости объединяются одним расчетным уравнением

где — коэффициент понижения допускаемого напряжения, который зависит от гибкости и от материала стержня

2. Пути аппроксимации и получения результата методом Ложкина

При первом рассмотрении проблемы нужно снять данные с графика

Мною было разработано программное обеспечение для снятия данных с графика <http://im7mortal.github.io/descart/>

Система представляет собой рабочую область и подвижную рабочую систему координат. Возможно задавать начало отсчета. Для получения масштаба и коэффициента приведения. Нужно указать на каждой оси хотя бы по одному значению. Система позволяет гибко масштабировать значения на оси, позволяя нивелировать погрешности и упрощения на графиках. Это также позволяет снимать значения с графиков, в которых одна из осей представлена в логарифмических координатах.

После загрузки графика в систему, указываем начало координат, в случае если график начинается не с нуля, сопоставляем начало координат графика с началом координат графической системы. Соотносим значения на осях график с отметками на накладной системы координат. Фиксируем систему координат и график После этого возможно построить точки. После первого клика на график система начинает автоматически расставлять точки через каждые 2 пикселя. После окончания расставления точек можно в ручную поправить точки которые создают грубую погрешность. После этого можно вычислить координаты каждой точки. Система вычисляет координаты точки в местных координатах, после этого система применяет для каждой координаты коэффициент приведения и выводит данные в формате csv(Comma-Separated Values) для координаты по оси x

Этот формат характеризуется удобностью экспорта в excel

Рис 102 График для определения критической силы при

На графике присутствует по оси у корень отношения критической силы к моменту инерции штока По оси х заданы отношения длины расстояние от головки штока гидроцилиндра до точки А к расстоянию от переходной точки А до шарнира корпуса гидроцилиндра. Заданное в логарифмическом масштабе.

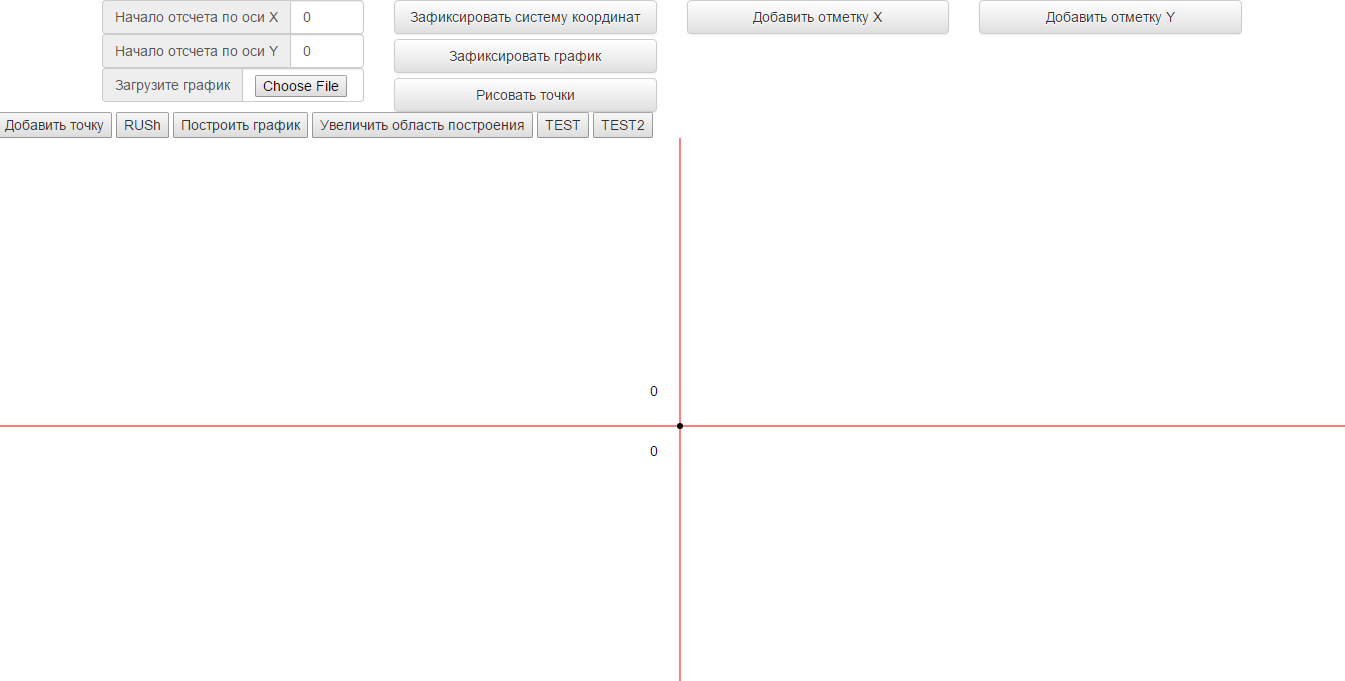


Рис 102 Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

После загрузки графика в программу и расставления отметок на график наносится порядка 500 точек. С каждой точки мы получаем координату по оси X и Y. Данные выгружаются в формате csv и имеют следующий вид

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 0.29878 | 1.989667 | 18.17834 |
| 0.30122 | 2.000873 | 18.17834 |
| 0.302439 | 2.006499 | 18.17834 |
| 0.304878 | 2.0178 | 18.17834 |
| 0.306098 | 2.023474 | 18.17834 |
| 0.307317 | 2.029164 | 18.09554 |
| 0.308537 | 2.03487 | 18.01274 |
| 0.309756 | 2.040592 | 17.92994 |
| 0.310976 | 2.04633 | 17.84713 |
| 0.312195 | 2.052084 | 17.84713 |
| 0.313415 | 2.057854 | 17.84713 |
| 0.314634 | 2.063641 | 17.84713 |
| 0.315854 | 2.069444 | 17.84713 |
| 0.318293 | 2.081099 | 17.76433 |
| 0.319512 | 2.086951 | 17.76433 |
| 0.320732 | 2.092819 | 17.76433 |
| 0.321951 | 2.098704 | 17.76433 |
| 0.323171 | 2.104606 | 17.76433 |
| 0.32439 | 2.110524 | 18.17834 |
| 0.32561 | 2.116458 | 17.76433 |

Первая колонка значения по оси x Вторая по оси у в степени 10 так как. Третья это по оси ую

Строим график по 3 и 1 колонке

Рис 102 Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

Данные мы отправляем в excel. И строим график по первому и второму столбцу

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

После построения графика мы аппроксимируем данный график

Всеми доступными в excel методами: экспоненциальным, линейным, логарифмическим, полиноминальным, степенным и методом скользящее среднее

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Пакет excel позволяет до 6 точек, что не имеет смысла при рассмотрении аппроксимации при 3 точках

Рис 102 График построенный по снятым точкам в нормальных координатах

Сравниваем все полученные функции с заданной функцией

Наилучший результат выдает степенной метод. Делаем вывод о степенном характере функции. Применяем этот метод для оставшихся зависимостей на всех графиках.

20,0681536703x-0,1912846398

21,7516447604x-0,1817998567

26,1170834981x-0,1887742364

30,0282094677x-0,1840523579

36,3449931092x-0,1746054668

44,5845699718x-0,1822722182

52,1712974745x-0,1895267231

63,1451681347x-0,1907236641

78,8651784116x-0,1877076150

95,1014008480x-0,1801238107

128,8201208159x-0,1830315477

151,6445975496x-0,1792692966

189,2379184975x-0,1735670967

Найдем среднее значение показателя степени

|  |
| --- |
| 0,1912846 |
| 0,1817999 |
| 0,1887742 |
| 0,1840524 |
| 0,1746055 |
| 0,1822722 |
| 0,1895267 |
| 0,1907237 |
| 0,1877076 |
| 0,1801238 |
| 0,1830315 |
| 0,1792693 |
| 0,1735671 |

0,183595271515385

Аппроксимируем оставшиеся графики

20,3610978338x-0,1756135183

20,8331900434x-0,1605430931

24,3610587803x-0,1609404998

29,5986502033x-0,1604475796

37,3681636160x-0,1491848190

46,3095292715x-0,1597536239

52,0925486106x-0,1547106218

63,9520527740x-0,1614957906

73,8857355468x-0,1524832528

93,3592043085x-0,1533909620

122,8856154718x-0,1565809720

144,6487707214x-0,1578378737

194,3811032238x-0,1624776046

Ср 0,1604325389

19,7761196279x-0,1343854743

21,0908436267x-0,127022628

24,0372819901x-0,1260665026

28,8468147109x-0,1219161050

37,5066129177x-0,1265664963

45,3358748624x-0,1231052209

50,0716137384x-0,1297446613

63,2550914749x-0,1332405106

74,0219972191x-0,1207082715

94,8750537439x-0,1344459626

123,0546323758x-0, 1220530407

141,2536854339x-0, 1280728924

184,7476122576x-0,1217649679

Ср 0,1300806823

19,0748816983x-0,1039075646

21,3084229914x-0,0936003986

25,3268229696x-0,0999524413

29,9953617866x-0,1052239638

37,4361374486x-0,1081062661

46,4106805620x-0,1005210177

52,7473227196x-0,1015539255

62,0771997483x-0,1028702730

70,1462685601x-0,0743922778

91,1400232820x-0,0972691330

126,6884779422x-0,1167976227

154,6613577225x-0,1091049465

182,7534598493x-0,0994840342

0,0993949969

19,2184510665x-0,0999783465

20,8331900434x-0,0905430931

24,3610587803x-0,0909404998

29,5986502033x-0,1004475796

36,3769772712x-0,0901393762

46,3095292715x-0,0997536239

52,0925486106x-0,1047106218

61,1233192197x-0,0986183646

73,8857355468x-0,1024832528

90,3471207694x-0,0972948873

122,8856154718x-0,1065809720

144,6487707214x-0,0978378737

184,1905946714x-0,0942165827

Ср 0,0960495115

19,0104248927x-0,0944813616

21,0908436267x-0,087022628

24,0372819901x-0,0860665026

28,8468147109x-0,0919161050

36,5547823432x-0,0870604217

45,3358748624x-0,0831052209

50,0716137384x-0,0797446613

60,6176175695x-0,0905066323

72,0219972191x-0,0807082715

89,3031747266x-0,0891473245

121,0546323758x-0,0920530407

143,2536854339x-0,0880728924

177,9796405943x-0,0748974167

Ср 0,0872186314

17,7264893200x-0,0754221381

19,9809049612x-0,0699078097

23,4620580816x-0,0688677520

28,4192389133x-0,0784898366

35,6930845085x-0,0727633973

43,8558390905x-0,0672848676

50,9268949751x-0,0752438340

61,2800197103x-0,0759173676

69,1537486032x-0,0824878574

89,5298427069x-0,0732296928

121,2724469728x-0,0682529838

143,5497702542x-0,0665414819

173,5614934835x-0,0599205538

Среднее значение 0,0718715056

Из полученных данных возможно проверить показатель степени и коэффициент на зависимости. Первым проверим коэффициент.

Сделаем выборку из 5 зависимостей. Заносим все данные в таблицу коэффициенты относительно и

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 | 20,068 | 20,361 | 19,776 | 19,074 | 19,218 | 19,010 | 17,726 |
| 1000 | 36,344 | 37,368 | 37,506 | 37,436 | 36,376 | 36,554 | 35,693 |
| 600 | 63,145 | 63,952 | 63,255 | 62,077 | 61,123 | 60,617 | 61,280 |
| 400 | 95,101 | 93,359 | 94,875 | 91,140 | 90,347 | 89,303 | 89,529 |
| 200 | 189,237 | 194,381 | 184,747 | 182,753 | 184,190 | 177,979 | 173,561 |

С увеличением прослеживается очень слабая зависимость с большой погрешностью

При этом чем больше тем явнее она видна(погрешность)

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 |  | -0.2930 | 0.5850 | 0.7020 | -0.1440 | 0.2080 | 1.2840 |
| 1000 |  | -1.0240 | -0.1380 | 0.0700 | 1.0600 | -0.1780 | 0.8610 |
| 600 |  | -0.8070 | 0.6970 | 1.1780 | 0.9540 | 0.5060 | -0.6630 |
| 400 |  | 1.7420 | -1.5160 | 3.7350 | 0.7930 | 1.0440 | -0.2260 |
| 200 |  | -5.1440 | 9.6340 | 1.9940 | -1.4370 | 6.2110 | 4.4180 |

Проверяем динамику увеличения

Разница положительная делаем вывод, о том что зависимость все же есть

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 | 0.0000 | -0.2930 | -0.0010 | 0.9930 | 1.8430 | 2.9010 | 5.2430 |
| 1000 | 0.0000 | -1.0240 | -2.1860 | -3.2780 | -3.3100 | -3.5200 | -2.8690 |
| 600 | 0.0000 | -0.8070 | -0.9170 | 0.1510 | 2.1730 | 4.7010 | 6.5660 |
| 400 | 0.0000 | 1.7420 | 1.9680 | 5.9290 | 10.6830 | 16.4810 | 22.0530 |
| 200 | 0.0000 | -5.1440 | -0.6540 | 5.8300 | 10.8770 | 22.1350 | 37.8110 |

Строим график по 4 линиям за исключение

Строим накопительную функцию делаем вывод о линейном характере функции. Аппроксимируем линейно

Полученная функция имеет вид

Получаем следующие данные

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |
| --- | --- |
| a | b |
| 14.381 | -21.722 |
| 8.0315 | -9.3761 |
| 2.7093 | -4.3038 |
| 1.9134 | -2.7103 |

Прослеживается зависимость при увеличении . Причем чем меньше тем больше она прослеживается. Но из-за наличия грубой погрешности дальнейшее исследование невозможно. Также делаем выводы, что из-за незначительности влияния (около 1-2% на конечные результат) этой зависимостью можно пренебречь.

Следующим шагом проверим влияние на коэффициент. Делаем выборку из 3 графиков различающихся

*Таблица №*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 4 | 2 | 1,1 |
| 2000 | 17,72648932 | 19,07488 | 20,06815 |
| 1750 | 19,98090496 | 21,30842 | 21,75164 |
| 1500 | 23,46205808 | 25,32682 | 26,11708 |
| 1250 | 28,41923891 | 29,99536 | 30,02821 |
| 1000 | 35,69308451 | 37,43614 | 36,34499 |
| 800 | 43,85583909 | 46,41068 | 44,58457 |
| 700 | 50,92689498 | 52,74732 | 52,1713 |
| 600 | 61,28001971 | 62,0772 | 63,14517 |
| 500 | 69,1537486 | 70,14627 | 78,86518 |
| 400 | 89,52984271 | 91,14002 | 95,1014 |
| 300 | 121,272447 | 126,6885 | 128,8201 |
| 250 | 143,5497703 | 154,6614 | 151,6446 |
| 200 | 173,5614935 | 182,7535 | 189,2379 |

Прослеживается явная зависимость. Проводим аппроксимацию.

Наилучший результат выдает степенная аппроксимация. Проводим аппроксимацию для выборки

4 36419x-1,004

2 36290x-0,996

1,1 36825x-0,996

Наблюдается явная связь с минимальной погрешностью. Приводим к общему виду

Строим график по данной функции

Следующим шагом проанализируем зависимости показателя степени

Построим сводную таблицу

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 | -0.19128 | -0.17561 | -0.13439 | -0.10391 | -0.09998 | -0.09448 | -0.07542 |
| 1750 | -0.1818 | -0.16054 | -0.12702 | -0.0936 | -0.09054 | -0.08702 | -0.06991 |
| 1500 | -0.18877 | -0.16094 | -0.12607 | -0.09995 | -0.09094 | -0.08607 | -0.06887 |
| 1250 | -0.18405 | -0.16045 | -0.12192 | -0.10522 | -0.10045 | -0.09192 | -0.07849 |
| 1000 | -0.17461 | -0.14918 | -0.12657 | -0.10811 | -0.09014 | -0.08706 | -0.07276 |
| 800 | -0.18227 | -0.15975 | -0.12311 | -0.10052 | -0.09975 | -0.08311 | -0.06728 |
| 700 | -0.18953 | -0.15471 | -0.12974 | -0.10155 | -0.10471 | -0.07974 | -0.07524 |
| 600 | -0.19072 | -0.1615 | -0.13324 | -0.10287 | -0.09862 | -0.09051 | -0.07592 |
| 500 | -0.18771 | -0.15248 | -0.12071 | -0.07439 | -0.10248 | -0.08071 | -0.08249 |
| 400 | -0.18012 | -0.15339 | -0.13445 | -0.09727 | -0.09729 | -0.08915 | -0.07323 |
| 300 | -0.18303 | -0.15658 | -0.12205 | -0.1168 | -0.10658 | -0.09205 | -0.06825 |
| 250 | -0.17927 | -0.15784 | -0.12807 | -0.1091 | -0.09784 | -0.08807 | -0.06654 |
| 200 | -0.17357 | -0.16248 | -0.12176 | -0.09948 | -0.09422 | -0.0749 | -0.05992 |

Проверим на зависимость от

Значение явно постоянно, что видно из графика. На графике присутствует систематическая погрешность, что не влияет на результат.

Проверим на зависимость от. Сперва округлим данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| Среднее | -0.1836 | -0.15888 | -0.12685 | -0.10098 | -0.09797 | -0.08652 | -0.07187 |

Производим аппроксимацию

Выбираем степенную аппроксимацию

Прослеживается явная зависимость. Наблюдается грубая погрешность.

Подставляем

Вставляем полученные данные в формулу расчета критической силы

По полученной формуле строим график в excel

Так как аппроксимировать степенным методом не получается при отрицательной степени делаем вывод, что на самом деле.