**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;

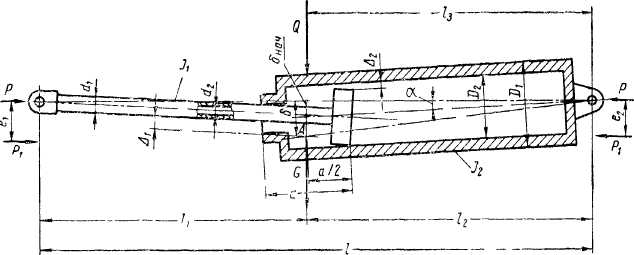


Рисунок 2.1 ‒ Схема нагружения силового гидроцилиндра

4) только центральные продольные сжимающие нагрузки. Первая схема нагружения гидроцилиндра показана на рисунке 2.1.

На практике наиболее часто встречаются схемы нагружения 2 и 4. Условные обозначения на схеме рис. 2.1:

— 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 №2.1*

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 |
|  | ***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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Наибольшее напряжение от сжатия и изгиба при рабочей нагрузке

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

(рассчитывается цилиндр при выдвинутом штоке).

Значение определяется из графиков определения критической силы

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |
|  | (5) |

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 (2), 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;

— коэффициенты ослабления сечения концентричным продольным отверстием.

Условие применимости данной методики

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

**Определение прогибов**

Полный прогиб определяется.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

где — диаметр штока;

при

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где — диаметр штока,

при

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Наибольший прогиб определяется в зависимости от схемы нагружения.

Схема 1:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Схема 2.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Схема 3:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Схема 4:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |
|  | (15) |
|  | (16) |
|  | (17) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Условие применимости вышеизложенной методики расчета на прочность и устойчивость

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

Согласно рекомендуемому ряду максимальный ход

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

где — коэффициент устойчивости;

— коэффициент приведенной длины.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |

Условие применимости формулы Эйлера:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |

где — предел пропорциональности для материала стержня;

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |
|  | (25) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |

где а и b — коэффициенты (см. табл. 2.2).

*Таблица №2.2*

Предельные гибкости и параметры a, b и c в зависимости от критического напряжения от гибкости для различных материалов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | a | b | c |  |  |
| Сталь Ст.3 | 3100 | 11,4 | 0,00 | 105 | 61 |
| Сталь Ст.6 | 4610 | 36,17 | 0,00 | 100 | 60 |
| Чугун | 7700 | 120 | 0,53 | 80 | - |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

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

2. Пути аппроксимации и получения результата

Для получения значения критической силы в настоящее время необходимо, снимать данные с графиков по значениям и . Это не является удобным в настоящее время. Для получения точного значения критической силы в зависимости от исходных данных.

Так как снятие данных в ручную заняло бы приличное количество времени и точность данных была бы подтверждена зрительной ошибке. Мною было разработано программное обеспечение для снятия данных с графика <http://im7mortal.github.io/descart/>

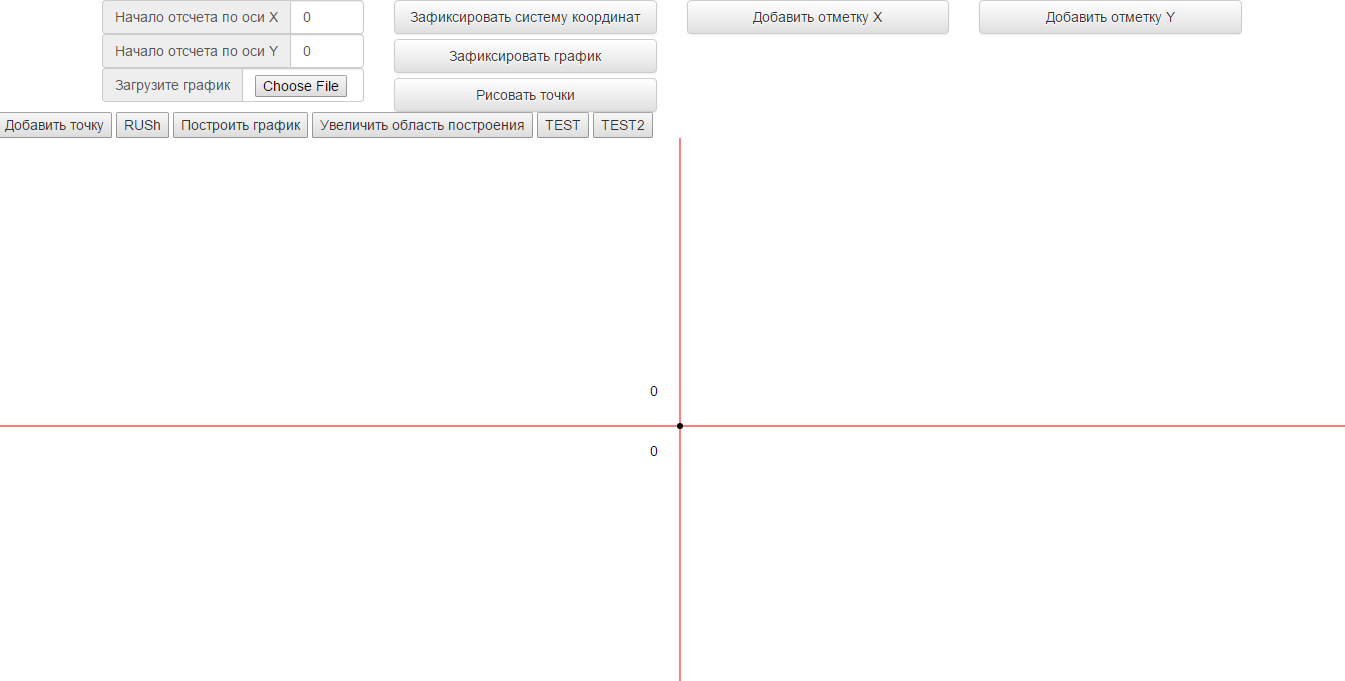
Система представляет собой рабочую область и подвижную рабочую систему координат. Возможно задавать начало отсчета. Для получения масштаба и коэффициента приведения. Нужно указать на каждой оси хотя бы по одному значению. Система позволяет гибко масштабировать значения на оси, позволяя нивелировать погрешности 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

Будем обозначать . Греческой буквой омега большая Ω а как омега маленькое ω и Θ для . График для определения критической силы при находится в приложении.

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.



Ω, ω

Рисунок 2.2 ‒ 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 lg(ω) и Ω. Данные выгружаются в формате csv и имеют следующий вид

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | lg(ω) | ω | Ω | № | lg(ω) | ω | Ω |
| 1 | 0.29878 | 1.98967 | 18.1783 | 16 | 0.32073 | 2.09282 | 17.7643 |
| 2 | 0.30122 | 2.00087 | 18.1783 | 17 | 0.32195 | 2.0987 | 17.7643 |
| 3 | 0.30244 | 2.0065 | 18.1783 | 18 | 0.32317 | 2.10461 | 17.7643 |
| 4 | 0.30488 | 2.0178 | 18.1783 | 19 | 0.32439 | 2.11052 | 18.1783 |
| 5 | 0.3061 | 2.02347 | 18.1783 | 20 | 0.32561 | 2.11646 | 17.7643 |
| 6 | 0.30732 | 2.02916 | 18.0955 | 21 | 0.32683 | 2.12241 | 17.6815 |
| 7 | 0.30854 | 2.03487 | 18.0127 | 22 | 0.32927 | 2.13436 | 17.6815 |
| 8 | 0.30976 | 2.04059 | 17.9299 | 23 | 0.33049 | 2.14036 | 17.6815 |
| 9 | 0.31098 | 2.04633 | 17.8471 | 24 | 0.33293 | 2.15242 | 17.5987 |
| 10 | 0.3122 | 2.05208 | 17.8471 | 25 | 0.33415 | 2.15847 | 17.5987 |
| 11 | 0.31341 | 2.05785 | 17.8471 | 26 | 0.33537 | 2.16454 | 17.5987 |
| 12 | 0.31463 | 2.06364 | 17.8471 | 27 | 0.33659 | 2.17063 | 17.5159 |
| 13 | 0.31585 | 2.06944 | 17.8471 | 28 | 0.3378 | 2.17673 | 17.5159 |
| 14 | 0.31829 | 2.0811 | 17.7643 | 29 | 0.33902 | 2.18285 | 17.5159 |
| 15 | 0.31951 | 2.08695 | 17.7643 | 30 | 0.34024 | 2.18899 | 17.5159 |

В первой колонке содержатся

Первая колонка значения lg(ω). Во вторую колонку система выводит ω. И lg(ω) ω в исходном графике были по оси x. В третьей колонке распологаются значения Ω, по оси y.

Построим график, как и в исходном графике, по значениям lg(ω) и Ω.

Рисунок 2.3 ‒ Первичный вид исходных данных на графике в логарифмических координатах по оси ω

На первый взгляд полученный график не похож на исходный график, что объясняется масштабом по осям lg(ω) и Ω. Построим график по значениям Ω и ω.

Рисунок 2.4 ‒ Первичный вид исходных данных на графике в декартовых координатах по оси ω

По графику можно судить, что функция имеет убывающий характер. Резко уменьшаясь при небольших значениях ω. Она нормализуется в дальнейшем и стремится к константному значению Ω

Для анализа зависимости будем использовать линию тренда. В пакете excel cсуществует шесть различных видов линия тренда (аппроксимация и сглаживание), которые могут быть отражены на диаграмме. Использование линии тренда того или иного вида определяется типом данных.

Точность аппроксимации. Линия тренда в наибольшей степени приближается к представленной на диаграмме зависимости, если величина достоверности аппроксимации равно или близко к 1. При аппроксимации данных с помощью линии тренда значение R-квадрат рассчитывается автоматически. Полученный результат можно вывести на диаграмме.

После построения графика мы аппроксимируем данный график

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

*Линейная аппроксимация*

Линейная аппроксимация — это прямая линия, наилучшим образом описывающая набор данных. Она применяется в самых простых случаях, когда точки данных расположены близко к прямой. Говоря другими словами, линейная аппроксимация хороша для величины, которая увеличивается или убывает с постоянной скоростью.

Получаем линейное уравнение где коэффициент у переменной отрицательный, что свидетельствует о убывающем характере функции. Значение R-квадрат = 0,0505, что свидетельствует что данный вид аппроксимации нам не подходит.

Рисунок 2.5 ‒ Линия тренда полученная путем линейной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

*Логарифмическая аппроксимация*

Логарифмическая аппроксимация хорошо описывает величину, которая вначале быстро растет или убывает, а затем постепенно стабилизируется. Описывает как положительные, так и отрицательные величины.

Рисунок 2.6 ‒ Линия тренда полученная путем логарифмической аппроксимации

Получаем логарифмическое уравнение где коэффициент у переменной отрицательный, что свидетельствует о убывающем характере функции. Кривая довольно хорошо описывает данные, поскольку значение R-квадрат, равное 0,9295, близко к единице.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |

*Полиномиальная аппроксимация*

Полиномиальная аппроксимация используется для описания величин, попеременно возрастающих и убывающих. Она полезна, например, для анализа большого набора данных о нестабильной величине. Степень полинома определяется количеством экстремумов (максимумов и минимумов) кривой. Полином второй степени может описать только один максимум или минимум. Полином третьей степени имеет один или два экстремума. Полином четвертой степени может иметь не более трех экстремумов.

Рисунок 2.7 ‒ Линия тренда полученная путем полиноминальной аппроксимации 2 степени

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (31) |

Рисунок 2.8 ‒ Применение линейной аппроксимации к исходным данным

После увеличение степени полинома, значение R-квадрат также увеличивается, увеличивая точность. Но визуально наблюдаются волны, что говорит о неприменимости данного метода. Пакет excel позволяет применять полином до 6 степени, но мы делаем вывод, что этот метод нам не подходит.

Рисунок 2.9 ‒ Линия тренда полученная путем полиноминальной аппроксимации 3 степени

Степенное приближение дает хорошие результаты, если зависимость, которая содержится в данных, характеризуется постоянной скоростью роста. Примером такой зависимости может служить график ускорения автомобиля. Если в данных имеются нулевые или отрицательные значения, использование степенного приближения невозможно.

Рисунок 2.10 ‒ Линия тренда полученная путем степенной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

*Экспоненциальная аппроксимация*

Экспоненциальное приближение следует использовать в том случае, если скорость изменения данных непрерывно возрастает. Однако для данных, которые содержат нулевые или отрицательные значения, этот вид приближения неприменим.

Рисунок 2.11 ‒ Линия тренда полученная путем экспоненциальной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (33) |

Сведем значения для R квадрат для всех методов в сводную таблицу.

|  |  |
| --- | --- |
| Метод аппроксимации | R2 |
| линейная | 0.5053 |
| логарифмическая | 0.9295 |
| полиноминальная 2 степени | 0.7138 |
| полиноминальная 3 степени | 0.8048 |
| степенная | 0.976 |
| экспоненциальная | 0.6013 |

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

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 Ω и

*Таблица №*

Значения аппроксимированного коэффициента в зависимости от Θ и Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω Θ | 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 Ω прослеживается очень слабая зависимость с большой погрешностью

При этом чем больше тем явнее она видна(погрешность)

*Таблица №*

Динамика изменений аппроксимированного коэффициента от Θ и Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω  Θ | 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

Рисунок 2.12 ‒ Динамика изменений аппроксимированного коэффициента

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

*Таблица №*

Динамика накопления изменений аппроксимированного коэффициента от Θ и Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω  Θ | 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

Рисунок 2.13 ‒ Динамика накопления изменений аппроксимированного коэффициента

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

Полученная функция имеет вид

Получаем следующие данные

*Таблица №*

Коэффициенты с аппроксимированной функции

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

Прослеживается зависимость при увеличении Ω. 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 Ω

*Таблица №*

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

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ω  Θ | 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 |

Рисунок 2.14 ‒ Функция аппроксимированных коэффициентов.

Рисунок 2.16 ‒ Применение степенной аппроксимации

Рисунок 2.17 ‒ Применение логарифмической аппроксимации

Рисунок 2.18 ‒ Применение экспоненциальной аппроксимации

Наилучший результат выдает степенная аппроксимация. Проводим аппроксимацию для выборки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ω  p | 1.1 | 1.3 |
| 2000 | -0.19128 | -0.17561 |
| 1750 | -0.1818 | -0.16054 |
| 1500 | -0.18877 | -0.16094 |
| 1250 | -0.18405 | -0.16045 |
| 1000 | -0.17461 | -0.14918 |

Наблюдается явная связь с минимальной погрешностью. Приводим к общему виду

Строим график по данной функции

Рисунок 2.19 ‒ Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

Следующим шагом проанализируем зависимости показателя степени

Построим сводную таблицу

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω  p | 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 Θ

Рисунок 2.20 ‒ Коэффициент в зависимости от Θ

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

Проверим на зависимость от Ω. Сперва округлим данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω | 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

Рисунок 2.21 ‒ Применения степенной линии тренда к аппроксимированным данным

Прослеживается явная зависимость. Наблюдается грубая погрешность.

Подставляем Ω

Вставляем полученные данные в формулу расчета критической силы

По полученной формуле строим график в excel

Рисунок 2.22 ‒ Сравнение полученной функции к исходным данным

Так как аппроксимировать степенным методом не получается при отрицательной степени делаем вывод, что необходимо преобразовать функцию к другому виду.

Рисунок 2.2 ‒ Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков