

Д.Ю. Кобзов¹, С.П. Ереско², Я. Райчык³, С.А. Зеньков¹

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ШТОКА ГИДРОЦИЛИНДРА

В настоящее время в качестве гидродвигателей возвратно-поступательного действия гидрофицированного рабочего оборудования машин широко используются гидроцилиндры двухстороннего действия с односторонним штоком [1].

Увеличение единичных мощностей машин подразумевает, применительно к гидроцилиндру, повышение уровня давления жидкости, увеличение скорости перемещения штока и его хода, а также размеров гидроцилиндров и интенсивности использования его во времени [2-8].

Негативным проявлением этой тенденции является резкое увеличение эксплуатационных нагрузок, ухудшение условий и режима функционирования гидроцилиндра, а вслед за этим, неизбежное снижение их надежности - в лучшем случае. В худшем - не исключена вероятность создания неработоспособного гидроцилиндра [2, 4, 8].

В этих условиях особое внимание при разработке гидроцилиндра следует уделять его несущей способности [2-4], то есть способности воспринимать эксплуатационную нагрузку без разрушения гидроцилиндра или его элементов, главным образом, без остаточной деформации штока.

В этом случае условие прочности штока описывается неравенством [2-4]

$$\sum \sigma_i = \frac{P}{F} + \frac{(M_Q + P y_i + P e)}{W} \leq [\sigma]$$

В нем: P - продольное толкающее (сжимающее) усилие гидроцилиндра; M_Q - изгибающий момент от поперечной (вес гидроцилиндра) нагрузки; F - площадь поперечного сечения штока; W - осевой момент сопротивления

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия.

² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. им. газеты "Красноярский рабочий" 31, Красноярск, Россия.

³ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: jrajczyk@bud.pcz.czest.pl

сечения штока; y_i - полный прогиб гидроцилиндра в результате его эксплуатационного продольного и поперечного нагружения, зависящий от осевого момента инерции I ; e - эксцентриситет приложения в опорах гидроцилиндра продольного сжимающего усилия P ; $\sum \sigma_i$ и $[\sigma]$ - текущие эксплуатационные и допускаемые напряжения в опасном сечении штока.

С целью снижения текущих напряжений $\sum \sigma_i$ предлагается при той же нагрузке выгодно изменить характеристики F , I и W [9].

В традиционных учебных курсах и справочниках по сопротивлению материалов и строительной механике уделяется обязательное и существенное внимание изучению вопросов выбора рациональных форм поперечного сечения стержней.

Последние можно представить состоящими из плоских фигур (поперечных сечений), центры тяжести которых вкуче являются осью стержня. Таким образом, определение таких геометрических характеристик плоских фигур, как координаты центра тяжести x , площади F , статического момента S , осевых моментов инерции I и сопротивления W , является неотъемлемой и одной из важных задач при исследовании указанных вопросов. Соответственно моделирование и оптимизация форм поперечных сечений как решение задачи поиска закономерностей количественно-качественной определенности является весьма актуальной.

Патентные исследования с целью анализа новых инженерных решений, направленных на улучшение напряженно-деформированного состояния штока круглого поперечного сечения [10-14], привели к следующей оригинальной формуле:

$$y(x) = \pm b(x/a)^n \left(1 - (x/a)^k\right)^l \quad (1)$$

Нетрудно видеть, что при аргументах $x = 0$ и $x = a$ функция $y = 0$. Таким образом, в интервале $0 \leq x \leq a$ получаем симметричный относительно оси x замкнутый контур.

Фигуры, контуром которых являются кривые, описываемые уравнением (1) и получаемые при варьировании параметрами a , b , n , k , l , как представляется нам, заслуживают внимания. Некоторые из них представлены на рисунке 1.

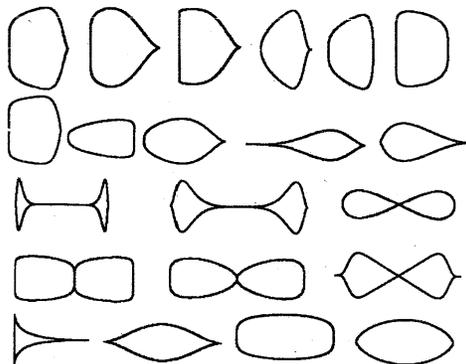


Рис. 1. Примеры некоторых фигур

Рассмотрим некоторые частные случаи.

При использовании плоской фигуры в качестве поперечного сечения штока гидроцилиндра желательно, чтобы ее контур описывался гладкой выпуклой кривой, в частности, для обеспечения герметичности. Кроме того, необходимо, чтобы поперечное сечение обладало лучшими геометрическими характеристиками, которые ответственны за прочность и жесткость гидроцилиндра в целом.

Целесообразно остановиться на более интересных моментах, вытекающих из анализа уравнения (1), соответствующих ему фигур и их основных характеристик.

При вычислении сопутствующих соответствующим геометрическим характеристикам сечения интегралов приходим к так называемому биномиальному интегралу, который в соответствии с теоремой Чебышева может быть выражен в элементарных функциях.

При $n = l = 0.5$ и $k = 1$ уравнение (1) описывает эллипс, а при $a = b$ - окружность.

При $n = 0.25$ и $k = l = 0.5$ получаем рассмотренную выше кривую, кардинально примечательной особенностью которой является то, что площадь полученной при этом фигуры совпадает с площадью эллипса.

При $n = p/2$, $k = p$ и $l = 0.5$ уравнение (1) после несложных преобразований совпадает с уравнением (2), которое вывел английский исследователь Т.К. Картер (Т.К. Carter) и которое позволило ему вычислять площадь поверхности и объем куриных яиц

$$y(x) = \pm b \left[1/4 - (x^p - 1/2)^2 \right]^{1/2} \tag{2}$$

Следует отметить, что применение формулы (1) позволяет более точно описывать кривизну кривой $y(x)$, соответствующей очертаниям различных известных и существующих форм яиц.

Для четных функций, как и следовало ожидать, проявляется свойство симметрии относительно оси y .

В качестве примера приводится эволюция изменения графиков зависимости (1) при фиксированных значениях параметров a и b для $l = 0.5$ и $n = k \cdot l$. В частности, при изменении k получены следующие фигуры (рис. 2).

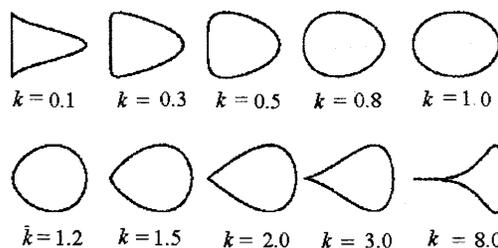


Рис. 2. Характер изменения фигуры при варьировании параметра k

Как видим, при $k = 1.0$ получается эллипс, т.е. при этом значении k существует вертикальная ось симметрии. Это свойство сохраняется и при других значениях параметра n , что также просматривается и на трех последних фигурах рисунка 1. При $k < 1.0$ наибольший поперечный размер фигур смещается влево. Кстати, исследование на экстремум функции (1) также элементарно, а кривые, описывающие соответствующие фигуры, становятся все менее выпуклыми и при некоторых значениях k теряют свойство выпуклости. Аналогичные, но не совсем такие же изменения происходят при $k > 1.0$.

Применительно к штоку гидроцилиндра рациональным решением, приводящим к повышению его прочности и жесткости, является предложение авторов выполнять наружную форму поперечного сечения штока в виде равнобедренного треугольника со скругленными вершинами. Причем основание треугольника расположено со стороны более сжатых волокон, а контур сечения описывается уравнением, которое получено из (1), в частности, для $n = 0.25$ и $k = l = 0.5$

$$y(x) = \pm b \sqrt{\sqrt{\frac{x}{a}} - \frac{x}{a}} \quad (3)$$

при всех прочих известных условиях [16-20].

В нем величины: a и b - максимальные размеры поперечного сечения штока соответственно по оси симметрии и перпендикулярно ей при всех известных существующих действительных изменениях аргумента x и функции $y(x)$.

График этой функции с наиболее характерными параметрами представлен на рисунке 3.

Предложенная замечательная функция (3) обладает рядом ожидаемых и примечательных свойств [16-20].

Во-первых, интегралы для определения основных характеристик фигуры выражаются в элементарных функциях.

Во-вторых, площадь $F = \pi ab/4$ функции $y(x)$ равна площади некоторых правильных фигур, в частности эллипса с параметрами a и b .

Далее, элементарно описываются центр тяжести и статический момент площади фигуры:

$$x_{c.g.} = \frac{7}{16}a; \quad S_y = \frac{7}{64}\pi a^2 b$$

в том числе - тривиально для осевых моментов инерции и моментов сопротивления:

$$I_y = \frac{33}{512}\pi a^3 b, \quad I_{yc} = \frac{17}{1024}\pi a^3 b, \quad I_x = \frac{\pi ab^3}{64}$$

$$W_{y_{max}} = \frac{17}{448}\pi a^2 b, \quad W_{y_{min}} = \frac{17}{576}\pi a^2 b, \quad W_x = \frac{\pi ab^2}{32}$$

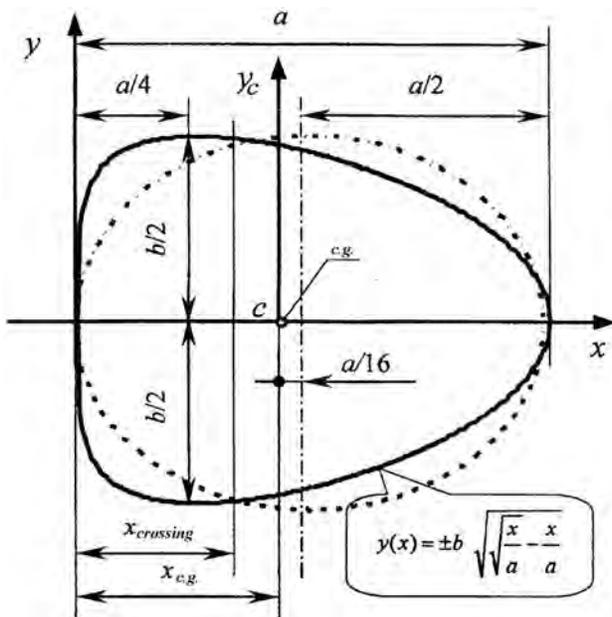


Рис. 3. График функции с наиболее характерными параметрами

Примечательно и то, что относительно оси симметрии x момент инерции и момент сопротивления фигуры определяются, как для эллипса. Следует отметить, что у фигур описываемого сечения моменты инерции и сопротивления (относительно оси y) на 30÷40% больше, чем у фигур сплошного круглого сечения и на 70÷80% больше, чем у фигур кольцевого сечения [19].

Интересно также то, что кривая, описываемая уравнением (2), может быть представлена в полярных координатах, уравнение которой получено, но ввиду громоздкости здесь не приводится [17, 18].

Кроме этого, координата пересечения фигуры с эллипсом, имеющими одинаковые параметры a и b , делит отрезок a в соотношении золотого сечения (число Фидия), где a, b - максимальные размеры фигуры соответственно по оси симметрии и перпендикулярно ей [17, 18].

Наконец, жёсткость поперечного сечения штока возрастает на 6%, что дополнительно уменьшает прогиб y , гидроцилиндра (выражение 1) [16, 19, 20].

При этом максимальные напряжения $\sum \sigma_i$ сжатия для продольно и поперечно нагруженного гидроцилиндра явно и значительно уменьшаются, применительно к аналогу и прототипу [9].

В заключение надо отметить, что применение предлагаемых функций и соответствующих ей замечательных фигур не ограничивается только составными стержневыми системами, а может быть распространено на такие технические объекты, как ободья, маховики, брусья, гаки, прокладки, кулачки и им подобные элементы механических систем.

Литература

- [1] Кобзов Д.Ю., Плешивцева С.В., Жмуров В.В., Анализ конструкции и перспективы развития гидропривода возвратно-поступательного действия, Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, Научный журнал ИрГУПС, Иркутск 2007, 4(16), 39-44.
- [2] Кобзов Д.Ю., Усова С.В., Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин, Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, Научный журнал ИрГУПС, Иркутск 2009, 3(23), 174-179.
- [3] Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Дорлигсүрэнгийн Л., Несущая способность и ресурс гидроцилиндров машин, Системы. Методы. Технологии, Научный журнал БрГУ, Братск 2009, 2, 24-28.
- [4] Kobzov D., Cherezov S., Dorlig L., The hydraulic system with auxiliary touch supporting hydrocylinder, Системы. Методы. Технологии, Научный журнал БрГУ, Братск 2011, 2(10), 50-51.
- [5] Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., О критериях работоспособности и надёжности гидроцилиндров, Системы. Методы. Технологии, Научный журнал БрГУ, Братск 2012, 1(13), 38-45.
- [6] Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Кобзова И.О., Кулаков А.Ю., Практические рекомендации по повышению конструктивной надёжности гидроцилиндров, Системы. Методы. Технологии, Научный журнал БрГУ, Братск 2012, 1(13), 45-49.
- [7] Кобзов Д.Ю., О надёжности и работоспособности гидроцилиндров повышенного типоразмера, Вестник Таджикского технического университета, Душанбе 2012, 4(20), 30-39.
- [8] Патент №2181452 РФ, МКИ F16J7/00. Шток гидроцилиндра / Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А. (РФ). - №2000108897/06; заявл. 10.04.00; опубл. 20.04.02, Бюл. №11.
- [9] А. с. №1386758 СССР, МКИ F15B15/04, E02F9/22. Гидросистема / Алексеенко П.Д., Кобзов Д.Ю., Решетников Л.Л., Сергеев А.П. (СССР). - №4131905/25-06; заявл. 08.12.87; опубл. 07.04.88, Бюл. №13.
- [10] А. с. № 1735620 СССР, МКИ F15B15/04. Гидросистема / Кобзов Д.Ю., Хютте В.И., Губанов В.Г., Калашников Л.А., Тарасов В.А., Крохичев А.С. (СССР). - №4776659/29; заявл. 02.01.90; опубл. 23.05.92, Бюл. №19.
- [11] А. с. №1807255 СССР, МКИ F15B15/00. Гидроцилиндр / Кобзов Д.Ю., Сергеев А.П., Губанов В.Г., Войткевич В.Б., Кобзов А.Ю., Тигунцев А.М., Тарасов В.А., Осминкин О.К. (СССР). - №4751982/29; заявл. 23.10.89; опубл. 07.04.93, Бюл. №13.
- [12] Патент №2050479 РФ, МКИ F15B15/04. Гидросистема / Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Кобзов А.Ю. (РФ). - №5026822/06; заявл. 12.02.92; опубл. 20.12.95, Бюл. 35.
- [13] Патент №2072455 РФ, МКИ F15B15/00. Гидроцилиндр / Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Свиридо И.В. (РФ). - №94006983/06; заявл. 25.02.94; опубл. 27.01.97, Бюл. №3.
- [14] Яйцо птицы - загадка мироздания. Режим доступа: <http://www.balatsky.ru/AVES/ovo.htm>.
- [15] Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Об оптимальном выборе формы поперечного сечения штока гидроцилиндра, Строительные и дорожные машины и их использование в современных условиях: Сб. тр. СПбГТУ, С.-Пб.: 1995, 106.
- [16] Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Лханаг Д., Моделирование формы поперечного сечения стержней, Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. Сб. тр. Вып. 7. СПбГАСУ, С.-Пб.: 2001, 102-107.
- [17] Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Бороздин О.П., Об одной математической модели поперечного сечения стержня, Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. Сб. тр. Вып. 7. СПбГАСУ, С.-Пб.: 2001, 102-108.

- [18] Kobzov D.Yu., Dorlig L., Deleg D., Tarasov V.A., On selecting the optimum form of the hydraulic cylinder rod cross-section, Metallurgy and Machine Building. MUST, Ulaanbaatar 2008, 1, 50-53.
- [19] Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., Дорлигсүрэнгийн Л., Дэлэг Д., Тарасов В.А., Optimum form of the hydraulic cylinder rod cross-section, Материалы международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2011», Белорус.-Рос. Ун-т, Могилев 2011, 106-109.
- [20] Rajczyk J., Podstawy naukowe doboru struktury geometrycznej i kinematyki elementów roboczych urządzeń do obróbki powierzchni betonowych, Wyd. Politechniki Czestochowskiej, Czestochowa 2004.

Резюме

В статье предложены формулы моделирования и оптимизации форм поперечного сечения штока гидроцилиндра. Их применение позволит существенно увеличить единичные мощности не только машин с гидроцилиндрами двухстороннего действия с односторонним штоком, но других технических объектов (ободья, маховики, брусья, прокладки и др.).

Ключевые слова: гидроцилиндр, шток, составная стержневая система, маховик, поперечное сечение, гидродвигатель

Optimization of cross-sectional shape rod cylinder

Abstract

The article suggests formulas modeling and optimization of cross-sectional shapes of the hydraulic cylinder rod. Their use will significantly increase the capacity of the unit is not only machines with double-acting hydraulic cylinders with single-rod, but other technical facilities (rims, flywheels, boards, pads, etc.).

Keywords: cylinder, piston rod, composite rod system, the flywheel, the cross-section, a hydraulic motor