

УДК 514.18: 37.02: 621.791.021: 62-408.64: 621.914.1

О ВОЗМОЖНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ПРОЕКЦИИ ЛИНИИ ВЗАИМНОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ ДУГОЙ ОКРУЖНОСТИ

Бут А.Ю.

Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, aybut@sevsu.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможности аппроксимации проекции линии пересечения двух цилиндров, пересекающихся под прямым углом, дугой окружности диаметром, равным диаметру большего из пересекающихся цилиндров, в определённом диапазоне соотношений их диаметров. Проведено исследование, в рамках которого выполнено графическое решение рассматриваемой задачи для различных соотношений диаметров d и D цилиндров. Измерены отклонения Δ аппроксимирующих дуг от точных проекций линий пересечения. По результатам измерений построен график зависимости максимального отклонения аппроксимирующей дуги Δ от соотношения диаметров пересекающихся цилиндров d/D . Показано, что в диапазоне соотношений $d \leq 0,6D$ аппроксимирующая дуга отклоняется от точной проекции линии пересечения в пределах 0,5% от D . Предложен вариант практического применения результатов работы для оптимизации процесса соединения элементов трубопроводов. Показано, что при использовании предлагаемого способа аппроксимации для определения контуров выреза на стыкуемых участках поверхностей труб схема формирования вырезов значительно упрощается, а процесс их получения можно производить посредством одной концевой фрезы, то есть без смены инструмента. Приведены схемы для расчёта контуров вырезов на стыкуемых трубах по предлагаемому способу.

Предмет исследования: случай пересечения двух цилиндров под прямым углом с варьирующимся соотношением их диаметров.

Материалы и методы: геометрический алгоритм моделирования линии взаимного пересечения двух цилиндров, пересекающихся под прямым углом, – кривой 2-го порядка – с использованием метода плоских посредников и компьютерного моделирования; метод аппроксимации в контексте рассматриваемой задачи.

Результаты: показано, что проекция линии взаимного пересечения двух цилиндров, пересекающихся под прямым углом, на плоскость, параллельную плоскости их симметрии, для определённого диапазона соотношений диаметров цилиндров может быть аппроксимирована дугой окружности диаметром, равным диаметру большего из пересекающихся цилиндров. Установлена зависимость точности аппроксимации от соотношения диаметров пересекающихся цилиндров. Определены значения максимальных отклонений аппроксимирующей дуги от точной линии для различных соотношений диаметров цилиндров и на основании полученных данных построен график этой зависимости. Предложен вариант практического применения предлагаемого способа аппроксимации для оптимизации технологического процесса соединения элементов трубопроводов. Приведена схема для расчёта вырезов на стыкуемых трубах.

Выводы: проекцию линии пересечения цилиндров, пересекающихся под прямым углом, на плоскость, параллельную плоскости их симметрии, в некотором диапазоне соотношений их диаметров можно с достаточной точностью аппроксимировать дугой окружности, диаметр которой равен диаметру большего из цилиндров. Точность аппроксимации зависит от соотношений диаметров пересекающихся цилиндров. Возможность применения предлагаемого способа аппроксимации и границы доверительного диапазона соотношений диаметров должны выбираться с учетом допустимой точности построений в конкретной инженерной задаче. Указанный способ аппроксимации может применяться, в частности, в процессах соединения элементов трубопроводов для расчета контуров вырезов на стыкуемых трубах, в результате чего схема и процесс формирования вырезов значительно упрощаются.

Ключевые слова: цилиндр, линия взаимного пересечения поверхностей, аппроксимация, дуга окружности, диаметр, труба, концевая фреза.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматривается одна из наиболее распространённых на практике задач: построение линии пересечения двух цилиндров, которые пересекаются под прямым углом.

Следует отметить, что у данной задачи есть как графическое, так и прикладное технологическое применение, о чём будет сказано ниже.

Точное решение рассматриваемой задачи пересечения цилиндров подчиняется следующей теореме: «Если пересекающиеся поверхности второго порядка имеют общую плоскость симметрии, то линия их пересечения проектируется на эту плоскость в виде кривой второго порядка». В частности, проекцией пространственной кривой линии пересечения двух цилиндров вращения с

пересекающимися осями на плоскость, параллельную плоскости симметрии поверхностей, является гипербола [1].

Следовательно, точная проекция этой линии строится с использованием метода посредников. Порядок построений для решения этой задачи рассмотрен, например, в [2]. Такие построения не составляют труда для специалистов, знакомых с азами начертательной геометрии, однако требуют некоторого времени.

Зависимость линии пересечения поверхностей вращения от соотношения их размеров рассмотрена на примере пересечения двух цилиндров в работе [3]. Здесь даётся общая характеристика и тенденция изменения внешнего вида пространственной кривой при изменении соотношений диаметров цилиндров. В работе [4] приведены основные сведения о проекциях линий (в форме классификации),

получаемых при пересечении поверхностей вращения, если соблюдены условия упомянутой выше теоремы.

В работе [5] решение задачи описано более детально. В частности, проекция кривой пересечения цилиндров в виде гиперболы приводится с её асимптотами и опорными точками.

В работе [6] получено уравнение, описывающее искомую равностороннюю гиперболу — плоскую кривую второго порядка.

Выше приведены лишь некоторые из множества источников с описанием решения данной классической задачи. По этой же причине в новой литературе не уделяется особое внимание указанной задаче.

Следует отметить, что во всех упомянутых источниках рассматривается именно графически точное решение. При этом подобная точность построений часто не имеет практического смысла на рабочих чертежах за исключением случаев, когда искомая линия пересечения является линией обработки (разделения, стыковки,гиба) материала для последующих технологических операций, например, сварки. В связи с этим возникает закономерная потребность в допустимом упрощении процесса построения этой линии.

ГОСТ 2.305-2008 [7] даёт следующие рекомендации для построения линии взаимного пересечения поверхностей: «9.4 На видах и разрезах допускается упрощенно изображать проекции линий пересечения поверхностей, если не требуется точного их построения. Например, вместо лекальных кривых проводят дуги окружности и прямые линии.»

Однако конкретные рекомендации для использования указанных упрощений в стандарте

отсутствуют. Получается, что автор чертежа должен принимать решение об использовании подобных упрощений самостоятельно, руководствуясь условиями конкретной технической задачи.

Цели данной работы:

1. Предложить и обосновать использование определённого способа упрощённого изображения проекции линии взаимного пересечения двух цилиндров под прямым углом;
2. Проанализировать возможный доверительный диапазон соотношений диаметров цилиндров, в котором упрощение по предлагаемому способу даёт удовлетворительные результаты;
3. С учётом установленного доверительного диапазона рассмотреть практическое применение способа упрощённого изображения упомянутой линии в технологических процессах и инженерных задачах.

1 ГРАФИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ

На начальном этапе данной работы было выдвинуто предположение о том, что проекцию линии пересечения двух цилиндров под прямым углом – равностороннюю гиперболу, получаемую при графическом решении задачи, в некотором диапазоне соотношений диаметров пересекающихся цилиндров можно с достаточной точностью аппроксимировать дугой окружности, диаметр которой равен диаметру большего из цилиндров. Схема такой аппроксимации представлена на рис. 1 для примера соотношения диаметров $d=0,5D$, где d и D – соответственно, диаметры меньшего и большего цилиндров.

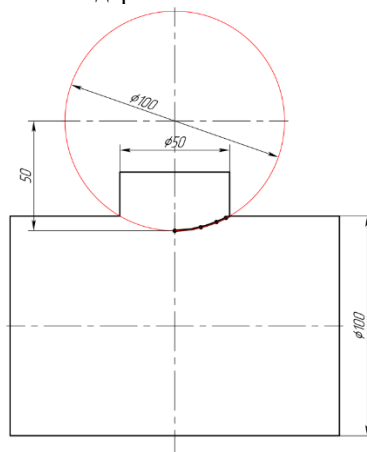


Рис. 1. Схема аппроксимации точной линии (гиперболы) дугой окружности
Fig. 1. Scheme of approximation of an exact line (hyperbola) by an arc of a circle

Для проверки предположения и достижения поставленных целей в рамках работы было проведено исследование: выполнено графическое решение рассматриваемой задачи методом плоских посредников для различных соотношений диаметров пересекающихся цилиндров, в диапазоне от $d=0,25D$ до $d=D$. Результаты решения

представлены на рис. 2. Здесь сплошной основной показаны точные линии, полученные путём классического решения методом посредников, а штриховой тонкой линией – аппроксимирующие дуги окружностей (по предлагаемому способу аппроксимации).

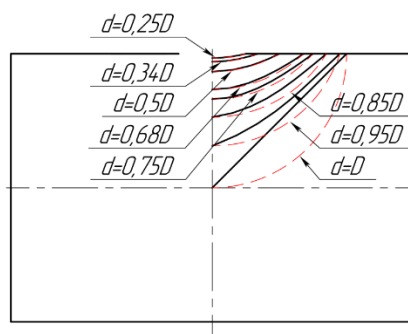


Рис. 2. Решение задачи пересечения двух цилиндров для различных соотношений их диаметров
Fig. 2. Solution of the problem of intersection of two cylinders for different ratios of their diameters

Затем были выполнены измерения максимального отклонения Δ аппроксимирующих дуг от соответствующих точных линий. Схема такого измерения приведена на рис. 3 для примера соотношения диаметров $d=0,85D$. Значения максимальных отклонений, измеренные в миллиметрах, затем были представлены в относительной форме – через диаметр большего из

цилиндров D . По результатам измерений построен график зависимости максимального отклонения Δ аппроксимирующей дуги от соотношения диаметров пересекающихся цилиндров d/D (рис. 4). На графике приведена линия тренда и аппроксимирующая функция исследуемой зависимости.

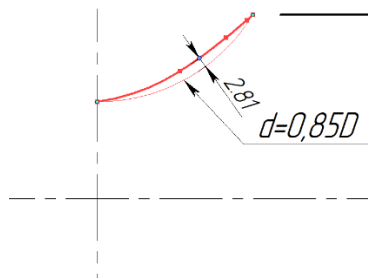


Рис. 3. Схема измерения максимального отклонения аппроксимирующей дуги от точной линии
Fig. 3. Scheme for measuring the maximum deviation of the approximating arc from the exact line

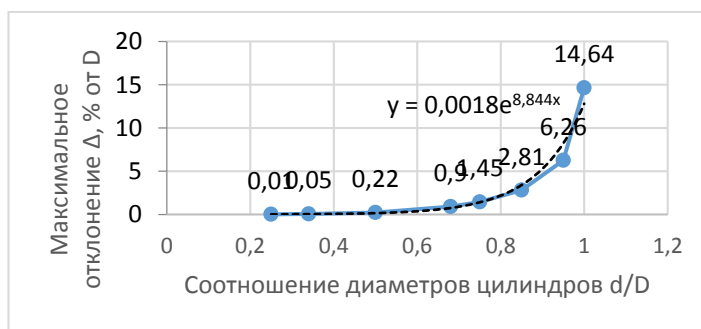


Рис. 4. График зависимости максимального отклонения Δ аппроксимирующей дуги от соотношения диаметров пересекающихся цилиндров d/D

Fig. 4. Graph of the dependence of the maximum deviation Δ of the approximating arc on the ratio of the diameters of the intersecting cylinders d/D

Из результатов исследования, в частности, из рис. 3, 4 можно заметить, что до соотношения диаметров $d=0,5D$ аппроксимирующая дуга практически совпадает с точной линией пересечения цилиндров (для $d=0,5D$ максимальное отклонение Δ составляет всего 0,22% от D).

2 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Кривые второго порядка, как и их проекции, часто лежат в основе формы технических конструкций и сооружений (как, например, описано в работах [8 – 10]). Поэтому результаты исследований в этой области неизменно находят практическое применение, и их важность

периодически подтверждается актуальными публикациями.

В качестве примера практического применения результатов данной работы предлагается их использование для оптимизации процесса соединения элементов трубопроводов.

Задача стыковки двух труб разного диаметра под прямым углом часто встречается в различных отраслях промышленности, где имеют место элементы трубопроводных систем. Один из наиболее распространённых случаев – это соединение металлических труб посредством их сваривания [11]. При таком процессе стыкуемые участки труб должны быть специальным образом подготовлены: торец одной трубы и боковая поверхность другой должны иметь специальные совмещаемые друг с другом вырезы или срезы, форма которых может варьироваться в зависимости от схемы стыковки. На практике вырезы часто выполняют по специальным накладным шаблонам, размер и форма которых рассчитываются исходя из размеров труб и схемы стыковки.

Если использовать предлагаемый способ аппроксимации в доверительном диапазоне соотношений диаметров стыкуемых труб, то схема и процесс выполнения вырезов на обеих трубах значительно упрощаются: в этом случае оба выреза можно выполнять на фрезерном станке одной концевой фрезой, диаметр которой равен диаметру

большой из стыкуемых труб. Ниже на рис. 5 представлены модели этапов процесса стыковки по предлагаемому способу. При этом глубина обоих вырезов рассчитывается из простых геометрических соотношений на основании всего двух параметров – диаметров d и D стыкуемых труб, и этот расчёт легко может быть оформлен в качестве программы для станка с ЧПУ.

Основываясь на первичных результатах данного исследования, в том числе трёхмерных моделях, для предлагаемого способа подготовки стыкуемых участков труб может быть рекомендован доверительный диапазон соотношений диаметров $d \leq 0,6D$. При этом аппроксимирующая дуга отклоняется от точной проекции линии пересечения цилиндров в пределах 0,5% от D (рис. 3, 4). Такие величины не выходят за пределы допусков сварных швов и сопоставимы с точностью подготовки стыкуемых участков классическими способами, например, газовой резкой с механической обработкой [12, 13], а минимальные зазоры заполняются при сваривании. Использование аппроксимации за пределами указанного диапазона d/D также возможно, однако её следует рассматривать в совокупности с такими факторами, как толщина стенок соединяемых труб и параметры выбранного типа сварного шва.

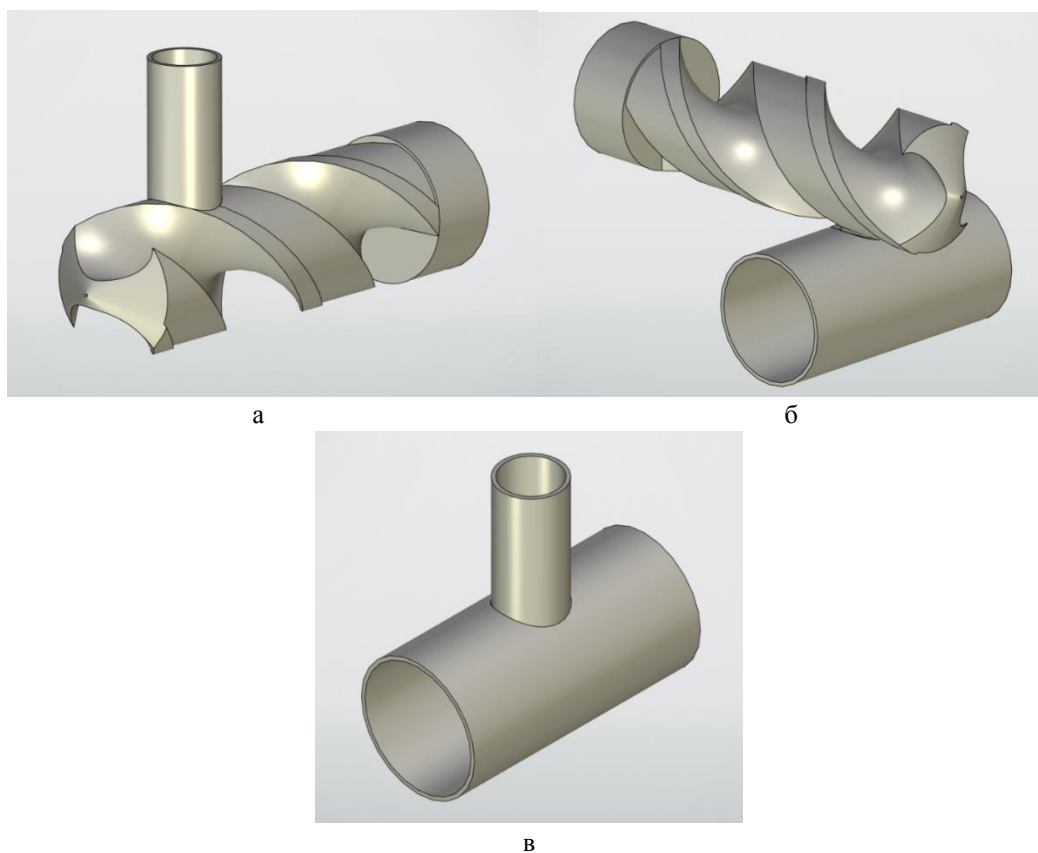


Рис. 5. Модели этапов процесса стыковки двух труб по предлагаемому способу: а, б – формирование требуемых вырезов на трубах концевой фрезой; в – элемент трубопровода – тройник – в сборе

Fig. 5. Models of the stages of the process of joining two pipes according to the proposed method: a, b - the formation of the required cuts on the pipes with an end mill; c - pipeline element - tee - complete

Схемы для расчёта вырезов на стыкуемых трубах меньшего и большего диаметров приведены на рис. 6 а и б, соответственно.

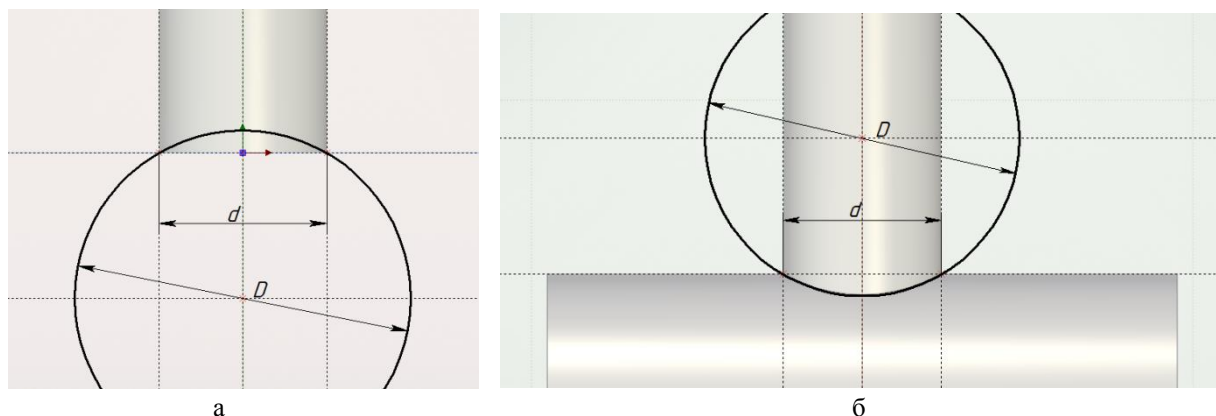


Рис. 6. Схемы для расчёта вырезов на стыкуемых трубах меньшего (а) и большего (б) диаметров
Fig. 6. Schemes for calculating cutouts on joined pipes of smaller (a) and larger (b) diameters

Толщина стенки трубы, часто обозначаемая в литературе как s , также влияет на размер напуска под обрезку по контуру отверстия, получаемого на трубе большего диаметра D (рис. 7, а). Для формирования вырезов на трубах и обрезки упомянутого напуска без смены инструмента, то

есть одной фрезой, может быть рекомендована ступенчатая концевая фреза с двумя рабочими участками разного диаметра (рис. 7, б). Реализация данного подхода требует более детального анализа и выбора типа инструмента – фрез.

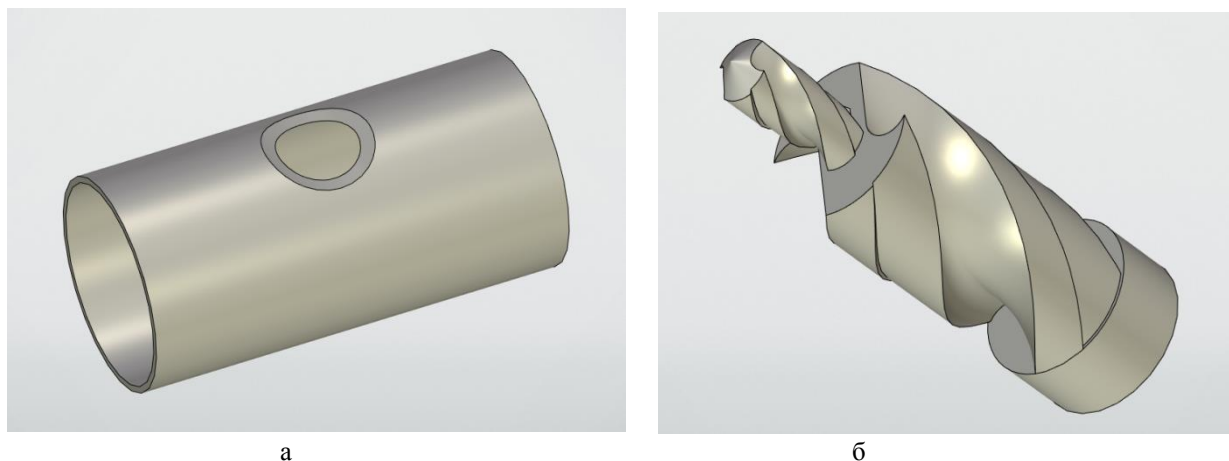


Рис. 7. Напуск по контуру отверстия (а) и предлагаемая ступенчатая концевая фреза (б) для его обрезки
Fig. 7. Overlap along the contour of the hole (a) and the proposed stepped end mill (b) for cutting it

ВЫВОДЫ

Проекцию линии пересечения двух цилиндров, пересекающихся под прямым углом, на плоскость, параллельную плоскости их симметрии, в некотором диапазоне соотношений их диаметров можно аппроксимировать дугой окружности, диаметр которой равен диаметру большего из цилиндров.

Точность аппроксимации зависит от соотношения диаметров цилиндров: так, при соотношении $d \leq 0,6D$ аппроксимирующая дуга отклоняется от точной проекции линии пересечения цилиндров в пределах 0,5% от D , что лежит в пределах допусков сварных швов.

Возможность применения предлагаемого способа аппроксимации и границы доверительного диапазона соотношений диаметров должны выбираться с учетом условий и требуемой точности построений в конкретной инженерной задаче.

Предлагаемый способ аппроксимации может применяться в прикладных инженерных задачах, например, в процессе стыковки элементов трубопроводов. Его использование позволяет значительно упростить схему и процесс выполнения вырезов на стыкуемых трубах: в этом случае оба выреза можно выполнять на фрезерном станке одной концевой фрезой, диаметр которой равен диаметру большей из стыкуемых труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубенников А.В., Громов М.Я. Начертательная геометрия. – Москва: Высшая школа, 1973. – 416 с.
2. Вышнепольский И.С. Техническое черчение: учебник для среднего профессионального образования. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2023. 319 с.
3. Фомичева Т.Н., Легкова И. А., Чистобородов Г.И. Построение линий пересечения поверхностей вращения: методические указания для студентов всех специальностей. Иваново – 2008. 40 с.
4. Глазунов Е.Л. О проекции линии пересечения двух поверхностей второго порядка, имеющих общую плоскость симметрии // Труды Московского семинара по начертательной геометрии и инженерной графике. М., 1958.
5. Фролов С.А. Начертательная геометрия. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
6. Козырев Э.В., Филоненко Л.А., Метелькова Н.В. Свойства линии пересечения поверхностей вращения с общей плоскостью симметрии // 7-я международная интернет-конференция «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации»: Доклады. Пермь: ПНИПУ, февраль – март 2017.
7. ГОСТ 2.305-2008 Единая система конструкторской документации. Изображения - виды, разрезы, сечения. Введ. 2009-07-01. М.: Стандартинформ, 2020. 23 с.
8. Конопацкий Е.В., Воронова О.С., Ротков С.И., Лагунова М.В., Бездитный А.А. Моделирование кривых 2-го порядка и поверхностей оболочек инженерных сооружений на их основе // Строительство и техногенная безопасность. Симферополь: КФУ им. В.И. Вернадского. 2021. № 22 (74). С.101-110.
9. Короткий В.А., Усманова Е.А. Применение кривых второго порядка для конструирования гладких каркасно-сетчатых поверхностей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Т.14. №3. С. 45-48.
10. Беляева З. В., Митюшов Е. А. Геометрическое моделирование пространственных конструкций. Своды // Вестник Томского государственного архитектурно – строительного университета. 2010. №1. С. 53 – 63.
11. Сварка трубопроводов / Ф.М. Мустафин, Н.Г. Блехерова, О.П. Квятковский, А. Ф. Суворов, Г. Г. Васильев, И. Ш. Гамбург, Ю. С. Спектор, Н. И. Коновалов, С. А. Котельников, Ф. М. Мустафин, Р. А. Харисов. М.: Недра, 2002. 352 с.
12. Руководящий документ РД 01-001-06. Сварка стальных газопроводов и газового оборудования в городском коммунальном хозяйстве и энергетических установках. Введ. 2007-07-12. М.: Спецстройсервис-92, 2007. 77 с.
13. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы,

конструктивные элементы и размеры. Введ. 1981-07-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 24 с.

REFERENCES

1. Bubennikov A.V., Gromov M.YA. Nachertatel'naya geometriya [Descriptive geometry]. Moscow: Vysshaya shkola. 1973. 416 p. (In Russian)
2. Vyshnepol'skij I.S. Tekhnicheskoe cherchenie: uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya [Technical drawing: a textbook for secondary vocational education]. 10-e izd., pererab. i dop. Moscow: Izdatel'stvo YUrajt, 2023. 319 p. (In Russian)
3. Fomicheva T.N., Legkova I. A., CHistoborodov G.I. Postroenie linij peresecheniya poverhnostej vrashcheniya: metodicheskie ukazaniya dlya studentov vsekh special'nostej [Construction of lines of intersection of surfaces of revolution: guidelines for students of all specialties]. Ivanovo – 2008. 40 p. (In Russian)
4. Glazunov E.L. On the projection of the line of intersection of two surfaces of the second order, having a common plane of symmetry // Proceedings of the Moscow Seminar on Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Moscow, 1958. (In Russian)
5. Frolov S.A. Nachertatel'naya geometriya [Descriptive geometry]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 240 s. (In Russian)
6. Kozыrev E.V., Filonenko L.A., Metel'kova N.V. Properties of the line of intersection of surfaces of revolution with a common plane of symmetry // 7th international Internet conference "Problems of the quality of graphic training of students in a technical university: traditions and innovations": Reports. Perm': PNIPU, fevral' – mart 2017. (In Russian)
7. GOST 2.305-2008 Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. Izobrazheniya - vidy, razrezy, secheniya [Unified system for design documentation. Images - appearance, sections, profiles]. Vved. 2009-07-01. Moscow: Standartinform, 2020. 23 p. (In Russian)
8. Konopackij E.V., Voronova O.S., Rotkov S.I., Lagunova M.V., Bezditnyj A.A. Modeling of curves of the second-order and surfaces of shells of engineering structures based on them // Construction and technogenic safety. Simferopol: V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2021. No. 22 (74). pp. 159-168. (In Russian)
9. Korotky V.A., Usmanova E.A. The use of second-order curves to construct smooth frame-mesh surfaces // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture, 2014. Vol. 14. No. 3. pp. 45 – 48. (In Russian)
10. Belyaeva Z. V., Mityushov E. A. Geometric modeling of spatial structures. Vaults // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno – stroitel'nogo universiteta. 2010. No 1. pp. 53 – 63. (In Russian)
11. Svarka truboprovodov [Pipeline welding] / F.M. Mustafin, N.G. Blekherova, O.P. Kvyatkovskij, A. F. Suvorov, G. G. Vasil'ev, I. SH. Gamburg, YU. S. Spector, N. I. Konovalov, S. A. Kotel'nikov, F. M.

Mustafin, R. A. Harisov. Moscow: Nedra, 2002. 352 p. (In Russian)

12. Rukovodyashchij dokument RD 01-001-06. Svarka stal'nyh gazoprovodov i gazovogo oborudovaniya

v gorodskom kommunal'nom hozyajstve i energeticheskikh ustanovkah [Welding of steel gas pipelines and gas equipment in urban utilities and power

plants]. Vved. 2007-07-12. Moscow: Spektroservis-92, 2007. 77 p. (In Russian)

13. GOST 16037-80. Soedineniya svarnye stal'nyh truboprovodov. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery [Welded joints in steel pipelines. Main types, design elements and dimensions]. Vved. 1981-07-01. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 1999. 24 p. (In Russian)

ON THE POSSIBILITY OF APPROXIMATION OF THE CYLINDERS INTERSECTION LINE PROJECTION WITH A CIRCULAR ARC

But A. Yu.

Sevastopol State University,
299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33, aybut@sevsu.ru

Abstract. The work is devoted to the study of the possibility of approximating the projection of the intersection line of two cylinders intersecting at a right angle by an arc of a circle with a diameter equal to the diameter of the largest of the intersecting cylinders, in a certain range of ratios of their diameters. A study was carried out, within the framework of which a graphical solution of the problem under consideration was made for various ratios of the diameters d and D of the cylinders. The deviations Δ of the approximating arcs from the exact projections of the intersection lines are measured. Based on the measurement results, a plot of the dependence of the maximum deviation of the approximating arc Δ on the ratio of the diameters of the intersecting cylinders d/D was plotted. It is shown that in the range of ratios $d \leq 0.6D$, the approximating arc deviates from the exact projection of the intersection line within 0.5% of D . A variant of the practical application of the results of the work to optimize the process of connecting pipeline elements is proposed. It is shown that when using the proposed approximation method to determine the contours of the cutout on the butt sections of the pipe surfaces, the scheme for forming cutouts is greatly simplified, and the process of obtaining them can be performed using one end mill, that is, without changing the tool. Schemes for calculating the contours of cutouts on joined pipes according to the proposed method are given.

Subject of study: the case of the intersection of two cylinders at a right angle with a varying ratio of their diameters.

Materials and methods: a geometric algorithm for modeling the line of mutual intersection of two cylinders intersecting at a right angle - a curve of the 2nd order - using the method of flat mediators and computer simulation; approximation method in the context of the problem under consideration.

Results: it is shown that the projection of the line of mutual intersection of two cylinders intersecting at a right angle on a plane parallel to their plane of symmetry, for a certain range of cylinder diameter ratios, can be approximated by a circular arc with a diameter equal to the diameter of the largest of the intersecting cylinders. The dependence of the approximation accuracy on the ratio of the diameters of intersecting cylinders is established. The values of the maximum deviations of the approximating arc from the exact line for various ratios of cylinder diameters are determined, and a graph of this dependence is plotted based on the data obtained. A variant of the practical application of the proposed approximation method for optimizing the technological process of connecting pipeline elements is proposed. A scheme for calculating cutouts on joined pipes is given.

Conclusions: the projection of the line of intersection of cylinders intersecting at right angles onto a plane parallel to their plane of symmetry, in a certain range of ratios of their diameters, can be approximated with sufficient accuracy by an arc of a circle, the diameter of which is equal to the diameter of the largest of the cylinders. The accuracy of the approximation depends on the ratio of the diameters of the intersecting cylinders. The possibility of using the proposed approximation method and the boundaries of the confidence range of diameter ratios should be chosen taking into account the acceptable accuracy of constructions in a specific engineering problem. This approximation method can be used, in particular, in the processes of connecting pipeline elements for calculating the contours of cutouts on joined pipes, as a result of which the scheme and the process of forming cutouts are greatly simplified.

Key words: cylinder, line of mutual intersection of surfaces, approximation, circular arc, diameter, pipe, end mill.