

DOI: 10.34220/2311-8873-2025-25-33



УДК 621.9.048

UDC 621.9.048

2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
И ПОВЕРХНОСТЕЙ
В КОМБИНИРОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТАХ**

**DESIGN AND USE OF CURVILINEAR
SURFACES AND SURFACES
IN COMBINED ELECTRODE
TOOLS**

✉¹ **Суворов Александр Петрович,**
к.т.н., доцент кафедры графики, конструи-
рования и информационных технологий в
промышленном дизайне, Воронежский гос-
ударственный технический университет,
г. Воронеж, e-mail: alex_diz@inbox.ru

✉¹ **Suvorov Alexander Petrovich,**
candidate of technical sciences, associate professor
of the department of graphics, design and infor-
mation technologies in industrial design, Voronezh
state technical university, Voronezh,
e-mail: alex_diz@inbox.ru

Кузовкин Алексей Викторович,
д.т.н., заведующий кафедрой графики, кон-
струирования и информационных технологий
в промышленном дизайне, Воронежский госу-
дарственный технический университет,
г. Воронеж, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Kuzovkin Aleksey Viktorovich,
doctor of technical sciences, head of the department
of graphics, design and information technologies in
industrial design, Voronezh state technical university,
Voronezh, e-mail: akuzovkin@mail.ru

Бондарев Александр Алексеевич,
студент кафедры систем информационной
безопасности, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: sasha02110@mail.ru

Bondarev Alexander Alekseevich,
student of the department of information security
systems, Voronezh state technical university,
Voronezh, e-mail: sasha02110@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются осо-
бенности применения поверхностей различ-
ной степени кривизны при проектировании
изделий средствами систем автоматизирован-
ного проектирования (САПР). В настоящее
время дизайнеры и конструкторы ведущих
промышленных стран в своей работе опира-
ются на классификацию таких поверхностей
по параметру непрерывности от G0 до G3. В
свою очередь, в соответствие параметрам не-
прерывности (G0-G3) производители слож-
ной и наукоемкой продукции (автомобильная
промышленность, авионика, сложная бытовая
и энергетическая техника и др.) ставят поня-
тие качества поверхности, которое описыва-

Annotation. The article discusses the features of
using surfaces of varying degrees of curvature in
the design of products using computer-aided de-
sign (CAD) systems. Currently, designers and en-
gineers from leading industrial countries rely in
their work on the classification of such surfaces by
the continuity parameter from G0 to G3. In turn,
in accordance with the continuity parameters (G0
- G3), manufacturers of complex and science-in-
tensive products (automotive industry, avionics,
complex household and energy equipment, etc.)
put the concept of surface quality, which is de-
scribed by indices C, B and A, respectively. How-
ever, it should be noted that at present there is no
regulatory framework that would control or regu-
late the surface quality in the specified indices. It

ется индексами С, В и А соответственно. Однако следует отметить, что на сегодняшний момент отсутствует нормативная база, которая контролировала бы или регламентировала качество поверхности в указанных индексах. Именно отсутствие документов в виде ГОСТов, ОСТов, стандартов сертификации или стандартов ISO заставляет различных производителей вводить свои собственные внутренние нормативные документы, определяющие понятие качества поверхности классов А, В и С. Известны работы в этом направлении таких компаний как Audi, SAAB, Toyota и др. В свою очередь, разработчики САПР, откликаясь на запросы своих потребителей, занялись разработкой отдельных модулей, либо расширением проектного функционала программных продуктов с целью обеспечения возможности работы с поверхностями классов А, В и С. Учитывая актуальность проблемы, связанной с возможностью реализации в различных САПР проектирования поверхностей различной степени кривизны, авторами проведен анализ особенностей доступного инструментария, алгоритмов его реализации и возможностями его применения в условиях твердотельного моделирования. Выявлены общие подходы получения такого рода поверхностей на основе интерполяционных и аппроксимационных кривых. Рассмотрены случаи, в которых целесообразно применять кривые Безье высокого порядка и указаны особенности сплайнового и NURBS моделирования. В качестве примера использования таких поверхностей приводится проектирование комбинированного электрод-инструмента (ЭИ) для электрофизикохимических методов обработки с криволинейными каналами для прокачки рабочей жидкости.

Ключевые слова: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, НЕПРЕРЫВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, КРИВЫЕ БЕЗЬЕ, СПЛАЙН, NURBS МОДЕЛИРОВАНИЕ.

is the absence of documents in the form of GOSTs, OSTs, certification standards or ISO standards that forces various manufacturers to introduce their own internal regulatory documents defining the concept of surface quality of classes A, B and C. Work in this direction is known from such companies as Audi, SAAB, Toyota, etc. In turn, CAD developers, responding to the requests of their customers, began to develop individual modules or expand the design functionality of software products in order to ensure the ability to work with surfaces of classes A, B and C. Given the relevance of the problem associated with the possibility of implementing the design of surfaces of varying degrees of curvature in various CAD systems, the authors analyzed the features of the available tools, algorithms for its implementation and the possibilities of its application in solid modeling. General approaches to obtaining such surfaces based on interpolation and approximation curves are identified. Cases are considered in which it is advisable to use high-order Bezier curves and the features of spline and NURBS modeling are indicated. As an example of using such surfaces, the design of a combined electrode-tool (ET) for electrophysical-chemical processing methods with curvilinear channels for pumping the working fluid is given.

Keywords: COMPUTER MODELING, COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS, SURFACE CONTINUITY, BEZIER CURVES, SPLINE, NURBS MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время большинство изделий, конкурентных и привлекательных на потребительском рынке, характеризуются наличием поверхностей, отвечающих двум главным потребительским свойствам. Первое – это высокое качество поверхности и, как следствие, высокие эксплуатационные свойства изделия в целом. Второе – это привлекательный внешний вид и высокие эргономические характеристики. Эти свойства во многом определяются применяемыми конструкционными материалами и технологическими методами их формообразования, обеспечивающими малую шероховатость поверхности, величину остаточных напряжений в поверхностном слое, плавность линий перехода одной поверхности в другую и тому подобные характеристики. С другой стороны, высокая степень кривизны готовых поверхностей, плавность линий и формы изделия обеспечивают целостность композиционного решения и, зачастую, являются определяющими для высокой потребительской привлекательности конечного продукта. В доступной литературе значительное внимание уделяется классификации и структуризации поверхностей как работающих на привлекательность изделия, так и на его высокие эксплуатационные характеристики [1-4]. При этом целостность формы, обеспечивающая высокие технические и потребительские характеристики, важна и для сугубо утилитарных машин и механизмов и для товаров широкого потребления. Анализ существующей нормативной базы показал, что каждый из производителей такой продукции пользуется собственными качественными характеристиками подобных поверхностей. Однако удалось выявить общие параметры, в трактовке которых подходы различных производителей очень похожи:

1) Поверхности класса А представляют собой составную поверхность, реализуемую с применением непрерывностей высокого порядка (G2 и G3). Именно поэтому при визуализации такие поверхности характеризуются неразличимыми стыками и плавными цельными бликами по всей поверхности, что хорошо видно при применении различных методик визуального анализа кривизны поверхности (зебра анализ, кривизна по Гауссу, анализ угла наклона и др.). Поверхности этого класса используются для моделирования объектов типа корпуса промышленного прибора, авионики и бытовой техники, мебели и т.д.

2) Поверхности класса В представляют собой составные поверхности, реализуемые с непрерывностью не выше G1. Такие поверхности при визуализации также характеризуются неразличимыми стыками, но при этом блики приобретают некоторое искажение. Подобные поверхности применяются при проектировании и производстве промышленных изделий, у которых снижены потребительские, эстетические и эксплуатационные свойства без потери функциональности и прочности.

3) Поверхности класса С представляют собой составную модель, реализуемую с использованием непрерывности G0. Такие поверхности при визуализации характеризуются различимыми стыками и ломаными бликами [5, 6]. Они применяются при проектировании деталей утилитарного назначения, как правило, скрытых от потребителя внутри устройства.

4) В связи с этим можно сделать вывод, что данный вид классификации скорее представляет собой маркетинговый подход для выделения в класс А абстрактной группы поверхностей, к которым предъявляются повышенные требования по степени непрерывности и кривизны. Как правило, эксплуатационные показатели поверхностей класса А практически ничем не отличаются от поверхностей В и С.

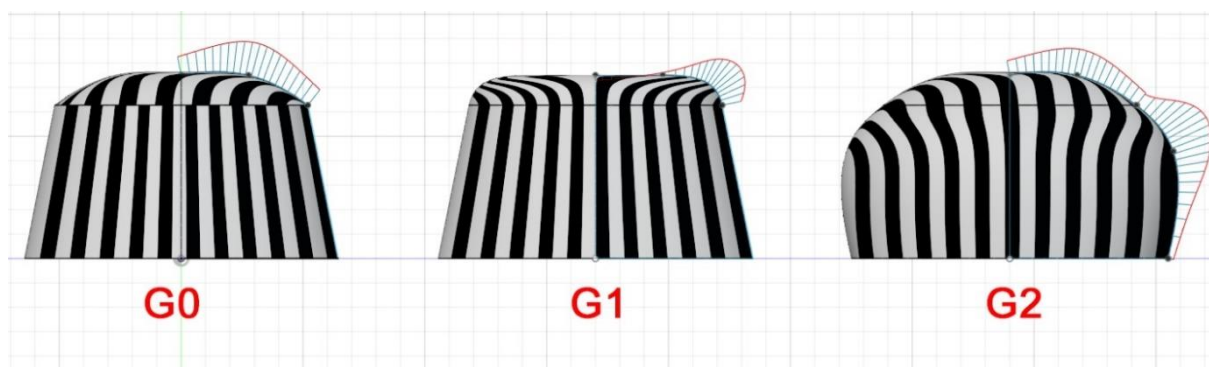
2 Материалы и методы

При проектировании реальных объектов промышленного дизайна приходится сочетать непрерывности G0, G1 и G2, применение каждого из которых зависит от поставленных задач. Как правило, выделенные типы непрерывности можно классифицировать следующим образом:

1) Непрерывность G0 (положение) означает, что конечные грани двух поверхностей соприкасаются. Касательные и значения кривизны кривых или поверхностей не совпадают. Переход между двумя ребрами или поверхностями представляет собой грань, что существенно заметно при проведении анализа зебра (рис. 1, а).

2) Непрерывность G1 (касательная) представляет собой более плавный переход между поверхностями. Две поверхности движутся в одном направлении в месте соединения, но коэффициент изменения кривизны (скорость) является заметным (рис. 1, б).

3) Непрерывность G2 (кривизна) – представляет собой плавный переход между поверхностями. Такой переход при проведении анализа “зебра” зрительно неразличим. Две кривые совпадают в конечных точках, являются касательными и имеют одинаковую “скорость” (кривизну) при соединении (рис. 1, в).



а – непрерывность G0; б – непрерывность G1; в – непрерывность G2

Рисунок 1 – Виды непрерывности поверхности

Современные САПР реализуют построение поверхностей с непрерывностью G0-G3 различными способами. На этапе эскизирования непрерывность G0 достигается соединением двух точек, то есть наложением на точки зависимости “Совпадение” (Coincident), непрерывность G1 характеризуется зависимостями “Совпадение” (Coincident) и “Касательная” (Tangent). Получение поверхностей, характеризующихся кривизной более высокого порядка (G2 и G3), вызывает определенные трудности. Это связано с тем, что их построение предполагает подбор уровня кривизны, который должен осуществляться вручную или уже с помощью инструментов твердотельного моделирования. Как правило, это реализуется с помощью операции “Сопряжение” (Fillet), которая в различных САПР организована по собственному алгоритму.

Таким образом, наблюдается определенное противоречие: на этапе разработки концепции будущего изделия закладывается форма поверхностей с высокой степенью кривизны, а конструкторская проработка на этапе твердотельного моделирования заставляет следовать по пути упрощения формы и снижения, в конечном счете, эксплуатационных и эстетических свойств готового изделия. При этом не все современные САПР обеспечивают возможность получения поверхностей с кривизной G3. Приведем список наиболее популярных программных продуктов с возможностью работы с поверхностями класса G3: Alias компании Autodesk, автономное программное обеспечение ICEM Surf, ICEM Shape Design и ICEM Shape Design AeroExpert, также следует отметить систему Dassault, интегрированную в виде отдельного модуля Catia V5.

3 Результаты исследований

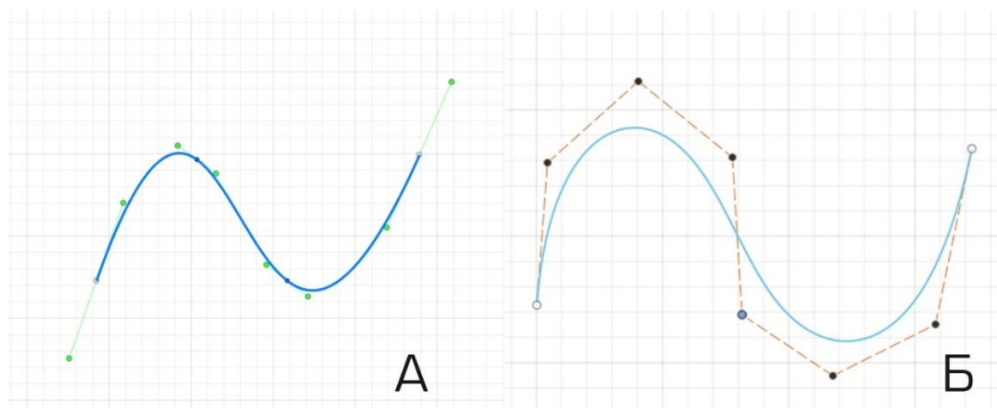
Установлено, что в современных САПР для использования в работе доступны кривые двух типов [7-9]:

1) Интерполяционные кривые, строящиеся через все контрольные точки, созданные пользователями. Наиболее активно применяемой кривой такого типа является кривая Эрмита (рис. 2, а).

2) Аппроксимационные кривые, реализующиеся на основе положения контрольных точек, но проходящие рядом с контрольной точкой. Из кривых данного типа, как правило, выделяют кривые Безье и В-сплайны (рис. 2, б).

Для получения кривых и поверхностей с высокой степенью кривизны целесообразно использовать кривые Безье высокого порядка (рис. 3). В таких кривых повышение количества опорных точек позволяет в большей степени управлять кривизной проектируемой кривой.

Однако у кривых Безье есть ряд недостатков. Во-первых, с их помощью достаточно сложно точно представить конические сечения (например, дугу окружности), а во-вторых, с увеличением числа контрольных точек достаточно сильно растет алгебраическая степень, что весьма затрудняет численные расчеты [10-12].



a – интерполяционная кривая; *б* – аппроксимационная кривая

Рисунок 2 – Кривые на основе сплайнов

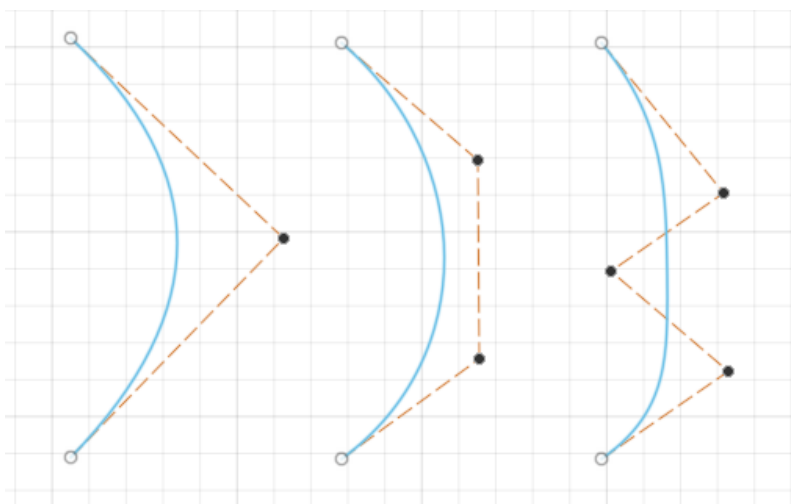


Рисунок 3 – Кривые Безье разного порядка

В связи с этими особенностями кривые Безье активно применяются для проектирования кривых и поверхностей с кривизной высокого порядка G2 и выше. Наиболее востребовано это при проектировании аэродинамических характеристик скоростных автотранспортных средств, что позволяет заметно улучшить их технико-экономические показатели. Снижение аэродинамического сопротивления повышает топливно-экономические и скоростные характеристики автотранспортного средства [13].

Данная технология наиболее полно реализована в программных средствах Autodesk Alias и ICEM Surf, где применяется для построения сложных поверхностей различного предназначения.

4 Обсуждение и заключение

В настоящее время при проектировании новых изделий большое внимание отводится не только функциональным характеристикам изделия, но и художественным, аэро(гидро)динамическим и эргономическим показателям. В достижении этих показателей важную роль играет использование поверхностей с непрерывностями высокого порядка.

Использование непрерывностей высокого порядка G2 и выше является важной при проектировании и дальнейшем изготовлении, например, элементов внешней и внутренней отделки автомобильной промышленности [14], где требуется совершенство формы и функциональное содержание каждой детали (рис. 4).

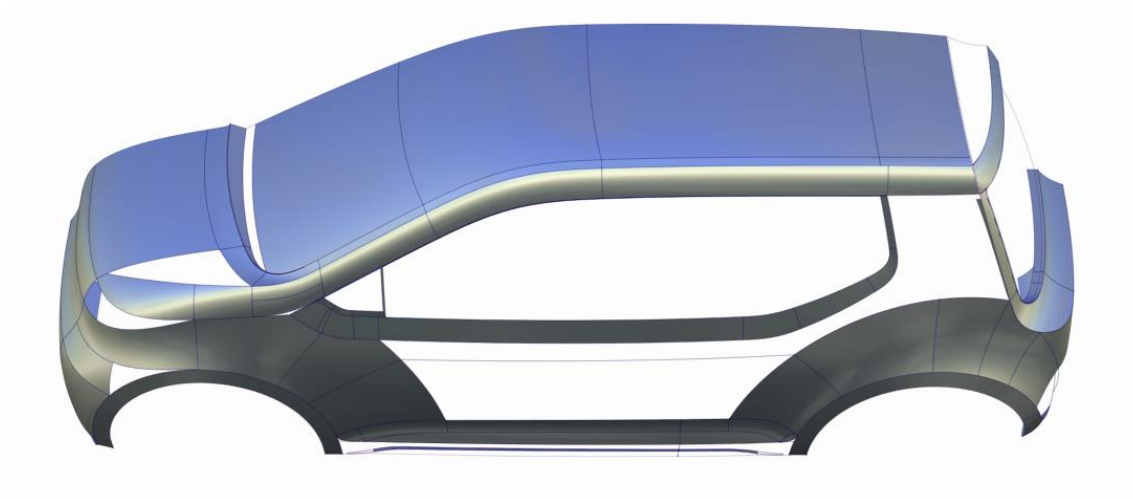
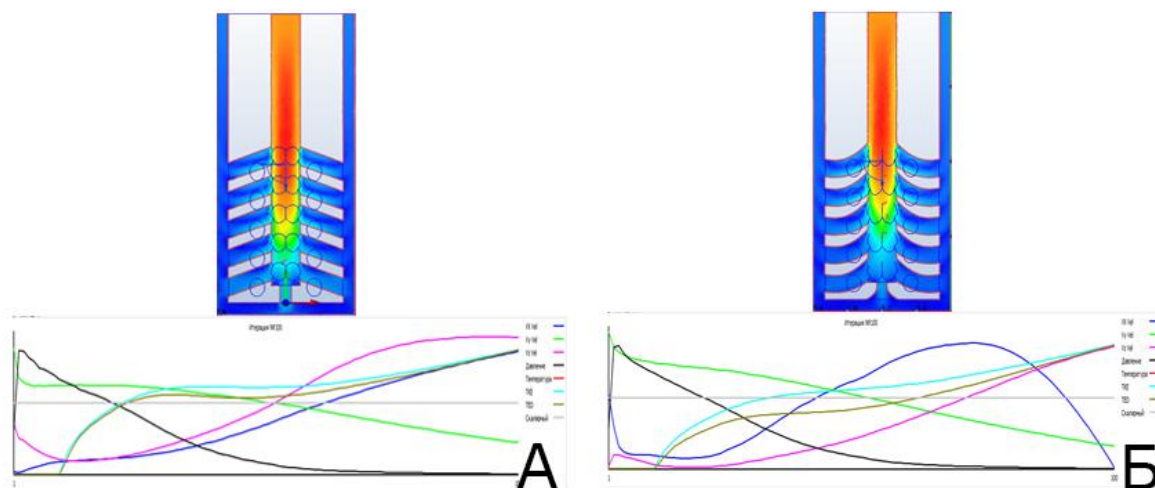


Рисунок 4 – Проектирование кузова автомобиля на основе криволинейных поверхностей

Требования по проектированию достигаются за счет использования в САПР поверхностей или патчей с непрерывностью требуемого типа и дальнейшим их объединением в полноценный объект. А вот изготовление штампов и пресс-форм для физической реализации процесса формообразования готовых деталей может быть реализовано с применением методов ЭЭ и ЭХ обработок. В этих случаях встает задача проектирования, изготовления и применения электродов инструментов (ЭИ) с рабочей поверхностью высокой степени кривизны. Повышение степени кривизны рабочей поверхности ЭИ, в свою очередь, вызывает образование застойных зон в зоне обработки, когда продукты обработки не могут эффективно удаляться из межэлектродного промежутка и процессы ЭЭО и ЭХО обработки снижают свою эффективность или полностью прекращаются. Проблему предлагается решать за счет использования комбинированного пористого ЭИ, полученного аддитивными методами.

Каналы подачи рабочих сред внутри ЭИ проектируются на основе кривых Безье. Это позволяет в процессе итераций достичь рациональной формы каналов, имеющих выгодные гидродинамические траектории, снижающие турбулентность и обеспечивающие равномерное распределение рабочих сред в зоне обработки. Кроме того, благодаря сглаженным контурам уменьшается вероятность образования застойных зон, что повышает эффективность вымывания продуктов ЭЭО и ЭХО (рис. 5).

Авторами было проведено компьютерное гидродинамическое моделирование, которое показало, что применение кривых Безье способствует улучшению гидродинамических характеристик каналов, снижает гидравлическое сопротивление. Повышение скорости потока рабочих сред обеспечивает стабильность протекания процесса обработки.



а – линейные каналы; *б* – каналы плавной формы на основе кривых Безье

Рисунок 5 – Гидродинамический анализ процесса прокачки электролита

Описанные выше особенности проектирования могут реализовываться во многих системах автоматизированного проектирования, в которых есть возможность проектирования на основе поверхностей или патчей. Наиболее удобными и обладающими необходимым функционалом являются системы Autodesk Alias и ICEM Surf. Они содержат в себе достаточно широкий набор инструментов для решения такого рода задач по сравнению с другими САПР. Как альтернативу реализации такого рода задач можно назвать использование других методов трехмерного моделирования, основанных на NURBS кривых или t -сплайнов в таких программах как Blender и 3ds max с последующей доработкой в системах автоматизированного проектирования и выдерживания требуемых характеристик, что существенно расширяет возможности современных САПР. Однако в данном случае возникает возможная сложность передачи данных между различными программными средствами, но универсальные зависимости, используемые при определении сплайнов, упрощают данную задачу [15].

Применение кривых Безье при проектировании комбинированных ЭИ расширяют возможности ЭЭО и ЭХО за счет повышения точности, эффективности и качества изготавливаемых деталей и узлов.

Список литературы

- 1 Муфтеев, В. Функциональные кривые высокого качества □ инновация в геометрическом моделировании от C3D Labs / В. Муфтеев, А. Максименко // САПР и графика. – 2021. – № 5(295). – С. 62-72.
- 2 Алешина, А. Э. Новый подход к автоматизации проектирования средств технологического оснащения для электрических методов обработки / А. Э. Алешина, А. В. Кузовкин, А. П. Суворов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 4, № 4(42). – С. 37-44.
- 3 Ившин, К. С. Принципы современного трехмерного моделирования в промышленном дизайне / К. С. Ившин, А. Ф. Башарова // Архитектон: известия вузов. – 2012. – № 3(39). – С. 11.
- 4 Кузовкин, А. В. Проектирование, изготовление и применение комбинированного инструмента для формирования криволинейных поверхностей / А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, Ю. С. Золототрубова // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 2, № 2(36). – С. 35-41.
- 5 Суворов, А. П. Использование методов поверхностного моделирования в условиях промышленного производства / А. П. Суворов, Д. Ю. Левин, С. Д. Кандыба // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2023. – № 2(45). – С. 16-19. – EDN SUTANU.
- 6 Сычева, А. А. Функционально-воксельное моделирование кривых Безье / А. А. Сычева // Геометрия и графика. – 2021. – Т. 9, № 4. – С. 63-72. – DOI 10.12737/2308-4898-2022-9-4-63-72. – EDN MGXBEE.
- 7 Короткий, В. А. Конструирование G2-гладкой составной кривой на основе кубических сегментов Безье / В. А. Короткий // Геометрия и графика. – 2021. – Т. 9, № 2. – С. 12-28. – DOI 10.12737/2308-4898-2021-9-2-12-28. – EDN NOIHOU.

- 8 Функционально- воксельное моделирование кривой Безье / М. А. Локтев, А. И. Разумовский, А. А. Сычева, П. М. Харланова // Перспективы науки. – 2020. – № 11(134). – С. 196-198. – EDN OPXBEN.
- 9 Зонтов, З. Е. Кривые Безье виды и способы построения / З. Е. Зонтов // Дни студенческой науки: Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ, Москва, 01–05 марта 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2021. – С. 455-457. – EDN FNEUXB.
- 10 Агеев, В. Н. Метод аппроксимации гладкого контура кривыми Безье / В. Н. Агеев, Н. И. Овсянникова // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 2(76). – С. 4-7. – EDN WDYMYG.
- 11 Chen F., Lou W. Degree Reduction of Interval Bézier Curves. CAD Computer Aided Design. 2000. vol. 32(10). pp. 571-582. EDN: AFOOSD
- 12 Fadhel, M. Geometric piecewise cubic Bézier interpolating polynomial with C2 continuity / M. Fadhel, Z. Omar // Informatics and Automation. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – P. 133-159. – DOI 10.15622/ia.2021.20.1.5. – EDN UMURSQ.
- 13 Ge Q.J., Kang D. Motion Interpolation With G2 Composite Bezier Motions. 1995. pp. 520-525
- 14 Кутяев, А. В. Влияние аэродинамики на формообразование кузова при проектировании автомобиля: специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кутяев Алексей Владимирович. – Москва, 2009. – 20 с. – EDN NKUFMJ.
- 15 Шикин Е.В., Борескова А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели.-М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001 – 464 – с.

References

- 1 Mufteev, V. High-quality functional curves - an innovation in geometric modeling from C3D Labs / V. Mufteev, A. Maksimenko // CAD and graphics. - 2021. - No. 5 (295). - P. 62-72.
- 2 Aleshina, A. E. A new approach to automating the design of technological equipment for electrical processing methods / A. E. Aleshina, A. V. Kuzovkin, A. P. Suvorov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 4, No. 4 (42). - P. 37-44.
- 3 Ivshin, K. S. Principles of modern three-dimensional modeling in industrial design / K. S. Ivshin, A. F. Basharova // Architecton: news of universities. – 2012. – No. 3(39). – P. 11.
- 4 Kuzovkin, A. V. Design, manufacture and application of a combined tool for forming curved surfaces / A. V. Kuzovkin, A. P. Suvorov, Yu. S. Zolototrubova // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – Vol. 2, No. 2(36). – P. 35-41.
- 5 Suvorov, A. P. Use of surface modeling methods in industrial production / A. P. Suvorov, D. Yu. Levin, S. D. Kandyba // Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. – 2023. – No. 2(45). – P. 16-19. – EDN SUTANU.
- 6 Sycheva, A. A. Functional-voxel modeling of Bezier curves / A. A. Sycheva // Geometry and graphics. - 2021. - Vol. 9, No. 4. - Pp. 63-72. - DOI 10.12737/2308-4898-2022-9-4-63-72. - EDN MGXBEE.
- 7 Korotkiy, V. A. Construction of a G2-smooth composite curve based on cubic Bezier segments / V. A. Korotkiy // Geometry and graphics. - 2021. - Vol. 9, No. 2. - Pp. 12-28. - DOI 10.12737/2308-4898-2021-9-2-12-28. - EDN NOIHOY.
- 8 Functional-voxel modeling of the Bezier curve / M. A. Loktev, A. I. Razumovsky, A. A. Sycheva, P. M. Kharlanova // Prospects of Science. - 2020. - No. 11 (134). - P. 196-198. - EDN OPXBEN.
- 9 Zontov, Z. E. Bezier curves types and construction methods / Z. E. Zontov // Days of Student Science: Collection of reports of the scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Civil Engineering and Architecture of the National Research University MGSU, Moscow, March 01-05, 2021. - Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2021. - P. 455-457. - EDN FNEUXB.
- 10 Ageyev, V. N. Method of approximating a smooth contour by Bezier curves / V. N. Ageyev, N. I. Ovsyannikova // Control Systems and Information Technologies. - 2019. - No. 2 (76). - P. 4-7. - EDN WDYMYG.
- 11 Chen F., Lou W. Degree Reduction of Interval Bezier Curves. CAD Computer Aided Design. 2000. vol. 32 (10). pp. 571-582. EDN: AFOOSD
- 12 Fadhel, M. Geometric piecewise cubic Bezier interpolating polynomial with C2 continuity / M. Fadhel, Z. Omar // Informatics and Automation. - 2021. - Vol. 20, No. 1. - P. 133-159. – DOI 10.15622/ia.2021.20.1.5. – EDN UMURSQ.

13 Ge Q.J., Kang D. Motion Interpolation With G2 Composite Bezier Motions. 1995. pp. 520-525

14 Kutyaev, A.V. The influence of aerodynamics on the body shaping in car design: specialty 05.05.03 "Wheeled and tracked vehicles": abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kutyaev Aleksey Vladimirovich. – Moscow, 2009. – 20 p. – EDN NKUFMJ.

15 Shikin E.V., Boreskov A.V. Computer graphics. Polygonal models.-M.: DIALOG-MIFI, 2001 – 464 p.

© Суворов А.П., Кузовкин А. В., Бондарев А. А., 2025