

В. Г. МУФТЕЕВ, В.Г. ГОЛОЦАПОВ  
 Башкирский государственный аграрный университет  
 М.М. АБДУЛЛИН, П.А. ФЕДОРОВ, М. М. ФАТТАХОВ  
 Уфимский государственный нефтяной технический университет  
 А.Н. РОМАНИУК  
 Винницкий национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВНОСТИ ОСИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

*Основным этапом проектирования автомобильных дорог является трассирование оси, целью которой является создание плавной кривой линии с привязкой к ландшафту местности. Этот этап является одним из сложных, трудоёмких, требующих от проектировщика как практических навыков так и эстетического вкуса, поэтому разработка инновационного программного обеспечения позволяющего создать оптимальную плавную геометрию оси автомобильной дороги при трассировании является актуальной задачей.*

*В данной работе рассматриваются основные аспекты геометрического моделирования плавности оси автомобильной дороги при трассировании. При ручном трассировании дороги традиционно используются три способа: способ «плавной от руки кривой»; способ «гибкой рейки»; способ «лекала». В системе автоматизированного проектирования (далее САПР) этим способам соответствуют способы: способ построения плавных сплайновых кривых, способ построения кривой с минимальной потенциальной энергией «Elastica», способ построения составной кривой из простых сегментов. При подготовке исходных данных для дальнейшего проектирования при моделировании касательной к ломаной оси трассы теодолитных ходов используется способ «лекала» (при выполнении вручную) и способ «составной кривой» (при использовании компьютерного моделирования). Эти способы не обеспечивают оптимальной плавности трассы, поэтому Авторами предлагается использовать при трассировании, способ «V-кривой», который позволяет получить качественные трассы, заданные как ломаные опорных точек, так и касательной ломанной теодолитных ходов.*

*Работа выполнена с помощью программы FairCurveModeler, являющейся приложением к графическому редактору AutoCAD.*

*Ключевые слова: трассирование; автомобильная дорога; плавность; кривая; лекало*

V.G. MUFTEJEV, V.G. GOLOCHAPOV  
 Bashkir State Agrarian University, Russia  
 M.M. ABDULLIN, P.A. FEDOROV, F.F. FATTACHOV,  
 Ufa State Petroleum Technological University, Russia  
 A.N. ROMANIUK  
 Vinnytsia National Technical University

## MODELING SMOOTHNESS AXIS ROAD FROM THE SOFTWARE FAIRCURVEMODELER

The main stage is designing roads tracing axis, whose main aim is to create a smooth curve with reference to the landscape areas. This stage is one of the most difficult, time-consuming requiring the designer as practical skills and aesthetic taste, so the development of innovative software allows you to create an optimal smooth geometry axis of the road when tracing is an urgent task.

This article discusses the main aspects of geometric modeling smooth road axis in tracing. When manually tracing roads traditionally used three ways: a way to «smooth curve of the hand»; method «flexible rack»; way «patterns». In computer-aided design, (CAD more) methods correspond to these methods: a method for constructing smooth spline curves, curve-fitting method with minimum energy «Elastica», a method of constructing a composite curve of simple segments. When preparing raw data for further design to simulate the tangent to the axis of the sloping track theodolite traverses used method of " patterns " (when running in manual) and the method of " composite curve " (using computer simulation). These methods do not provide the optimal smoothness of the track. The authors propose a method to use when tracing «V- curve», which allows you to track quality defined as broken reference points and tangent polyline theodolite traverses.

Work is done by using FairCurveModeler, which is an application to a photo editor AutoCAD.

Keywords: tracing; road; smooth, curve, curve

### Введение

Одним из параметров, качества автомобильной дороги, принято считать плавность её оси или трассы. Авторами работы отмечается, что одним из критериев, транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог, является плавность трассы, которая формируется на этапе трассирования и геометрического конструирования. Недостаточная проработка проекта на этом этапе трудно исправляется при дальнейших ремонтах и при реконструкции.

Плавность кривой характеризуется порядком гладкости, количеством вершин (экстремумов кривизны) и плавностью графика кривизны по длине кривой. Одним из значимых параметров плавности является потенциальная энергия кривой.

Для трассирования автомобильных дорог применяются способы «гибкой рейки» и «тангенциального трассирования». Суть этих способов заключается в следующем:

- способ «тангенциального трассирования» (традиционный способ) состоит в том, что на план или карту наносят с помощью линейки ломаный (тангенциальный) ход, в изломы которого вписывают круговые кривые либо круговые кривые со вспомогательными переходами [2, 6];
- способ «гибкой рейки» заключается в том, что на крупномасштабном плане или карте, согласуя с рельефом и ситуацией, вписывают плавную линию от руки или с помощью специальной гибкой линейки –

сплайна. Линия контура физического сплайна в виде гибкой рейки или “линейки” представляет кривую с наименьшей потенциальной энергией из всех кривых, проведенных через заданные опорные точки карты. При этом способ построения «плавной линии от руки» никак не вписывается принцип «гибкой рейки». Поэтому способ «вписывания плавной кривой от руки» выделим в отдельный способ;

В работе [2] установлено, что кривая с минимальной потенциальной энергией является основой базового способа при трассировании – способа «гибкой рейки».

#### **Постановка задачи**

Рассмотрим способы трассирования автомобильной дороги с точки зрения геометрического моделирования кривых линий в САПР.

Ручному способу “плавной от руки кривой” в САПР соответствуют способы моделирования плавных сплайновых кривых – кривых высокого порядка гладкости с плавным изменением графика кривизны.

Если линия трассы определяется контуром гибкой рейки, деформированной и зафиксированной грузиками или другими приспособлениями так, что контур проходит по вершинам ломаной опорных точек или проходит касательно к ломаной тангенциального хода, то это способ «гибкой рейки» или физического сплайна (термин *spline* на английском языке означает гибкую рейку). Способ физического сплайна апробирован многолетней практикой конструирования обводов судов, самолетов, автомобилей в плазово-шаблонном производстве. Контур гибкой рейки представляет плавную кривую с наименьшей потенциальной энергией при данном расположении грузиков (книц).

В САПР – физически сплайн моделируется кривой с минимальной потенциальной энергией, построенной на опорных точках или касательной ломаной. Минимизация потенциальной энергии приводит к более плавной форме кривой и, как было показано авторами [3], к уменьшению энергетических затрат на перемещение транспортного средства по трассе.

В настоящее время ведутся исследования по разработке способов моделирования кривых с минимальной потенциальной энергией (“*elastica*” по определению Эйлера) [4].

Если линия трассы определяется набором лекального вида отрезков, окружностей и сегментов дуг окружностей, сегментов клотоидных кривых, сегментов некоторых фиксированных кривых, то это способ «лекал». В САПР этому ручному способу соответствует способ моделирования составной кривой, состоящей из сегментов фиксированных кривых (отрезков, окружностей и сегментов дуг окружностей, сегментов клотоидных кривых, S-образных сегментов, сегментов некоторых фиксированных кривых) по определенным условиям равенства граничных параметров, смежных сегментов вида касательных и значений кривизны [1].

Наиболее универсальный способ, используемый в САПР, это способ построения NURBS кривых.

Применение NURBS кривых низкой степени абсолютно неприемлемо для моделирования функциональных кривых высокого качества. Родовая болезнь NURBS кривых низких степеней с единичными весами – осцилляция кривизны на сегментах.

Для построения кривых высокого качества применяют NURBS кривые высокой степени (не ниже 5-ой степени). Различают два подхода. Первый подход – подгонка некоторого образца NURBS кривой к моделируемой кривой с помощью управляющих точек. При высоких степенях сплайна и большом количестве опорных точек процесс подгонки становится очень трудоемким. Вторым подходом – способы построения по опорным точкам моделируемой кривой и по узловым точкам сплайна. Эти способы обладают крайней неустойчивостью и предполагают исправление формы NURBS кривой и ее подгонки к моделируемой кривой также с помощью управляющих точек.

Очевидно, что способы САПР не должны уступать способам ручного моделирования (в частности, способу гибкой рейки). То есть, смоделированные кривые, как и контуры гибкой рейки, должны обладать малыми значениями потенциальной энергии.

В настоящее время не существует приемлемых для практики способов построения сплайновой кривой надлежащего качества на касательной ломаной. Например, квадратичный сплайн (как и все сплайны низких степеней), построенный на касательной ломаной абсолютно не удовлетворяет требованиям к качеству линии трассы. Квадратичный сплайн имеет очень низкий порядок гладкости и выраженные концентрации кривизны на сегментах сплайна.

Актуальной задачей является разработка геометрического способа моделирования кривой линии при трассировании дороги, обеспечивающего высокое качество кривой по критериям плавности, малое значение потенциальной энергии и возможность моделирования на ломаной опорных точек и касательной ломаной.

#### **Экспериментальная часть**

Для моделирования трассы высокого качества по критериям плавности предлагается способ «V-кривой» и способы изогометрической аппроксимации «V-кривой» посредством NURBzS кривой и «b-сплайновой» кривой высокой степени. «V-кривая» или виртуальная кривая (*virtual curve*) не имеет аналитического выражения и алгоритмически строится как огибающая непрерывного множества конических кривых двойного соприкосновения.

«V-кривые» обеспечивают не только высокий порядок плавности (5-ый порядок), но и плавность изменения кривизны по длине кривой. Это “фирменное качество” v-кривой.

Сравнение качества кривых, построенных с помощью «V-кривых» и способами NURBS кривых CAD-систем неизменно показывает также преимущество v-кривых также по параметру потенциальной энергии кривой. То есть, v-кривые обладают малым значением потенциальной энергии. И в этом смысле v-кривая наиболее близка к виртуальной модели гибкой рейки.

Можно предложить следующее обоснование этого свойства v-кривой. Идеальной кривой «V-кривой», как сплайна, является коническая кривая. То есть «V-кривая» вырождается в аналитическую коническую кривую, при принадлежности опорной или касательной ломаной конической кривой. Для сравнения, идеальной кривой кубического сплайна является кубический параметрический полином.

Конические кривые по энергетическим параметрам более предпочтительны по сравнению с параметрическими полиномами. Траектории планет, сохраняющих импульсы движения, представляют конические кривые. Упругий замкнутый обруч принимает форму окружности с минимальной потенциальной энергией.

«V-кривую» можно определять на геометрическом определителе (далее ГО) вида касательной ломаной и опорной ломаной. Благодаря этому свойству дуальности (двойственности) представления V-кривой, для моделирования плавной трассы по тангенциальной ломаной теодолитных ходов также можно использовать способ «V-кривой».

При этом качество трассы, определенной на опорной ломаной и касательной ломаной, будет одинаково высокого качества по критериям плавности.

Построение трассы высокого качества по способу «V-кривой» реализуется с помощью программы FairCurveModeler. Программа имеет различные реализации: web-приложение, приложение AutoCAD, приложение Mathematica. Для моделирования трассы можно использовать любую реализацию. Для моделирования «V-кривой» непосредственно в среде AutoCAD Civil можно использовать приложение AutoCAD. Приложение позволяет редактировать динамически в режиме реального времени форму «V-кривой» изменением конфигурации опорной ломаной или касательной ломаной. Реализована методика инкрементального, с заданным шагом, перемещения вершины опорной ломаной или касательной ломаной с отображением графика кривизны. Для более локального редактирования можно добавлять (или удалять) точки.

Для демонстрации построения трассы приложением FairCurveModeler используется рельеф местности из упражнения приведенного в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Фрагмент рельефа местности с осью трассы приведен на рисунке 1.

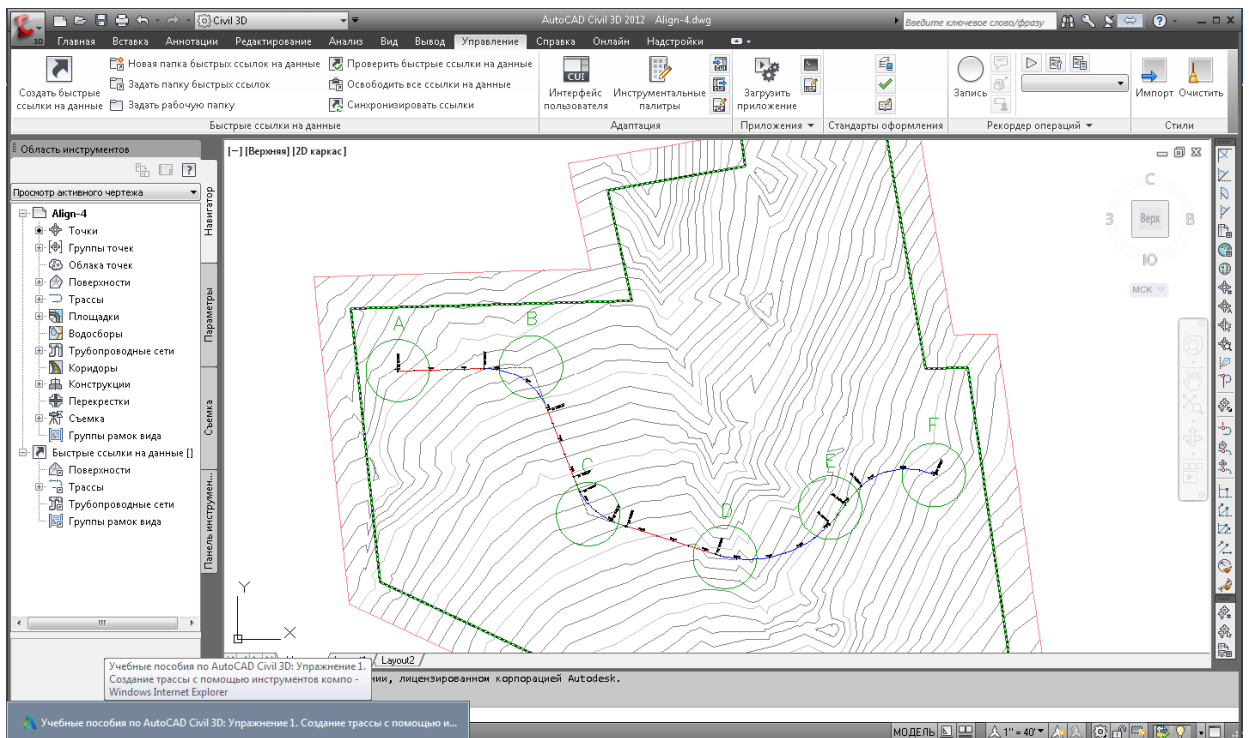


Рис. 1.

Предположим, что в стороне от населенных пунктов за линией эквидистанты необходимо построить скоростную трассу (см. рисунок 2, а).

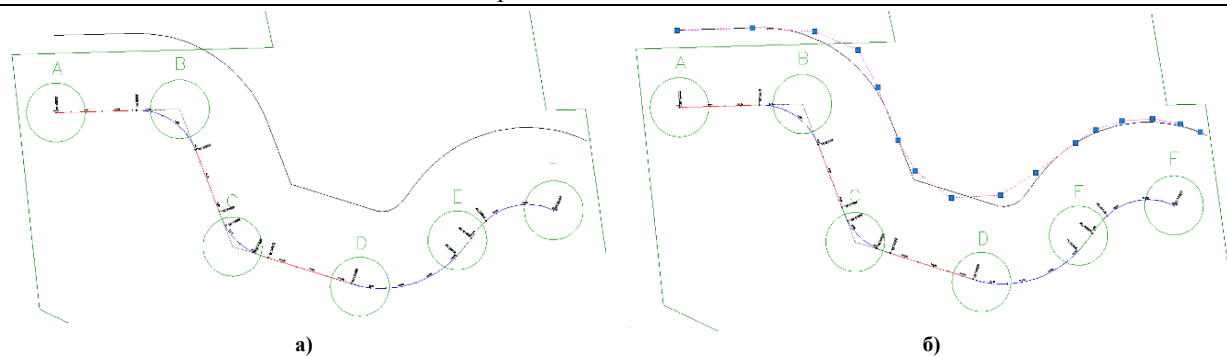


Рис. 2.

Структурируем трассу касательной ломаной. Как видно из рисунка 2,б касательная ломаная однозначно регламентирует форму моделируемой кривой. Командой «3DPoly» строим ломаную. С помощью приложения FairCurveModeler построим V-кривую, изогометрически аппроксимированную посредством NURBS кривой, и проверим качество выводом графика кривизны (рисунок 3, а).

NURBS аппроксимация сохраняет качество «V-кривой» на выпуклых участках: высокий порядок гладкости и плавность изменения кривизны. На участках перегиба и концевых участках выхода на нулевую кривизну обеспечивает гладкость 2-го порядка. При построении «V-кривой» можно задавать граничные условия вида касательных и значений кривизны. Можно редактировать касательную ломаную с отображением графика кривизны.

После достижения надлежащего качества графика кривизны аппроксимируем «V-кривую» «b-сплайновой» кривой 8-ой степени. Результат аппроксимации приведен на рисунке 3,б.

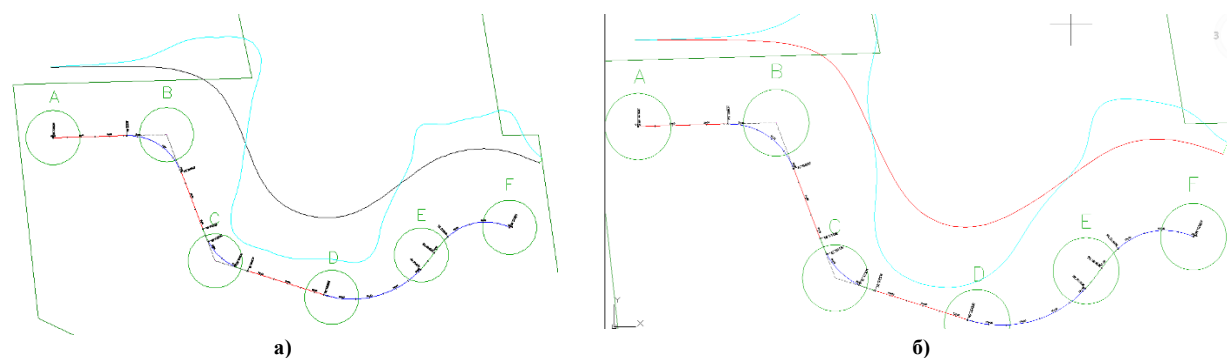


Рис. 3.

«b-сплайновая» кривая высокой степени, построенная по способу изогометрического восстановления на ГО Эрмита «V-кривой», сохраняет качество v-кривой на выпуклых участках, улучшает форму плоской на участках перегиба и улучшает форму пространственной, обеспечивая высокий порядок гладкости во всех точках кривой и плавность кривизны и кручения.

Можно и дальше редактировать линию трассы на «s-полигоне» «b-сплайновой» кривой 8-ой степени, добиваясь лучшего графика кривизны.

Наилучшая структуризация линии трассы производится касательной ломаной. Можно структурировать трассу также опорной ломаной, однако при структуризации опорной ломаной на участках перегиба ломаной возникает высокая степень неопределенности положения точек перегиба и направлений касательных в этих точках. Для устойчивого формообразования участков с точками перегиба предлагается следующий способ.

Моделируемая кривая разбивается на ряд локально выпуклых участков фиксацией точек перегиба и касательных в этих точках. Затем на каждом локально выпуклом участке строится «V-кривая». Опорная ломаная редактируется до достижения приемлемого графика кривизны. Затем выполняется переход к ГО вида касательной ломаной.

Все касательные ломаные по локально выпуклым участкам объединяются в одну касательную ломаную с пропуском точек перегиба. Точные положения точек перегиба затем можно уточнить на общей касательной ломаной по опции «фиксированная точка на звене» программы FairCurveModeler. В дальнейший алгоритм моделирования выполняется по алгоритму структуризации формы трассы касательной ломаной.

Для переноса NURBS кривой, построенной с помощью приложения FairCurveModeler, в структуру трассы AutoCAD Civil можно использовать два подхода: построенная «b-сплайновая» кривая вводится в трассу как «фиксированная кривая»; «b-сплайновая» кривая высокой степени аппроксимируется стандартными элементами трассы. Кривая разбивается на ряд сегментов командой Break. Затем командой v\_test\_brk приложения FairCurveModeler определяются и формируются в виде ломаных интерполированные

точки, в виде окружности значения кривизны в конечных точках сегментов, в виде отрезков касательные в конечных точках сегментов. По этим данным формируются элементы трассы - "плавающие кривые с переходными кривыми".

#### Основные выводы

1. Способ «V-кривой» с аппроксимацией NURBS кривой обеспечивает высокое качество трассы выпуклой формы.
2. Способ «V-кривой» с аппроксимацией «b-сплайновой» кривой высокой степени обеспечивает высокое качество трассы с участками перегиба и пространственной формы с обеспечением высокого порядка гладкости с плавным изменением кривизны и кручения во всех точках кривой.
3. Возможность определения «V-кривой» на дуальном геометрическом определителе позволяет строить и редактировать трассу одинаково высокого качества как на опорной ломаной, так и на касательной ломаной.
4. Приложение FairCurveModeler позволяет динамически редактировать трассу на дуальном геометрическом определителе в режиме реального времени непосредственно в среде AutoCAD Civil.
5. Предложен способ аппроксимации трассы сегментами типовых элементов трассы вида плавающих кривых с переходными кривыми.

#### Литература

1. Трассирование автомобильных дорог в CREDO [Электронный ресурс]. В. В. Филиппов, д-р техн. наук, профессор, ХАДИ, г. Харьков, Г. В. Величко, канд. техн. наук, академик Транспортной Академии Украины, НПО "Кредо-Диалог". Программный комплекс CREDO. 2002.
2. Справочная энциклопедия дорожника [Текст] / МИНТРАНС РОССИИ, Росавтодор. – М.: Информавтодор, 2004 –Т. 5: Проектирование автомобильных дорог / ред. Г. А. Федотов, П. И. Поспелов. - 2007. - 668 с.
3. Муфтеев, В.Г. Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия [Текст] / В.Г. Муфтеев, С.Г. Мударисов, И.М. Фархутдинов, А.Р. Марданов, А.С. Семенов, М.А. Талыпов // Известия международной академии аграрного образования. – 2013. – Вып. 17. – С. 90-93.
4. Chan C. L., Muhammad A., Jamaludin Md Ali. Approximating GCS by Low Energy Hermite Curve [Электронный ресурс]. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.46 No.4 (2010), pp.616-626. © EuroJournals Publishing, Inc. 2010. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
5. Пелевина, И. А. Самоучитель AutoCAD Civil 3D 2010 [Текст]: учебное пособие / И. А. Пелевина. - СПб. : БХВ-Петербург, 2010. - 502 с. : ил.
6. Абдуллин, М.М., Архитектурно-ландшафтное проектирование дорог с учётом дорожной геометрии: учебник /М. М. Абдуллин, М. М. Фаттахов, П. А. Федоров. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2011. – 320 с.

#### References

1. Tracing Highway CREDO [electronic resource]. VV Filippov, Dr. Sc. , Professor, Hadi, Kharkov, GV Velichko, Cand. tehn. Sciences, Academician of the Transport Academy of Ukraine, NGO "Credo-Dialogue." Program complex CREDO. 2002.
2. Reference Encyclopedia Roadman [Text] / RUSSIAN MINISTRY OF TRANSPORT, Rosavtdor. - M. : Informavtdor 2004 -T. 5: Design of roads / ed. GA Fedotov, P. Pospelov. - 2007. - 668 p.
3. Mufteev, VG Justification of the choice of the optimal form of the functional curve of the dynamic surface maintenance products [Text] / VG Mufteev, SG Mudarisov, IM Farkhutdinov, AR Mardanov AS Semenov, MA Talypov // Proceedings of the international academy of agricultural education. - 2013. - Vol. 17. - P. 90-93.
4. Chan C. L., Muhammad A., Jamaludin Md Ali. Approximating GCS by Low Energy Hermite Curve [Electronic resource]. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.46 No.4 (2010), pp.616-626. © EuroJournals Publishing, Inc. 2010. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
5. Pelevina, IA Teach Yourself AutoCAD Civil 3D 2010 [Text]: a tutorial / IA Pelevina. - SPb. : BHV-Petersburg, 2010. - 502 p. : Ill.
6. ABDULLIN, MM, architectural and landscape design of roads, taking into account the geometry of the road: a textbook / M. M. ABDULLIN, MM Fattakhov, P. Fedorov. - Ufa Petroleum Engineering, 2011. - 320 p.

Рецензія/Peer review : 9.9.2014 р. Надрукована/Printed : 16.11.2014 р.