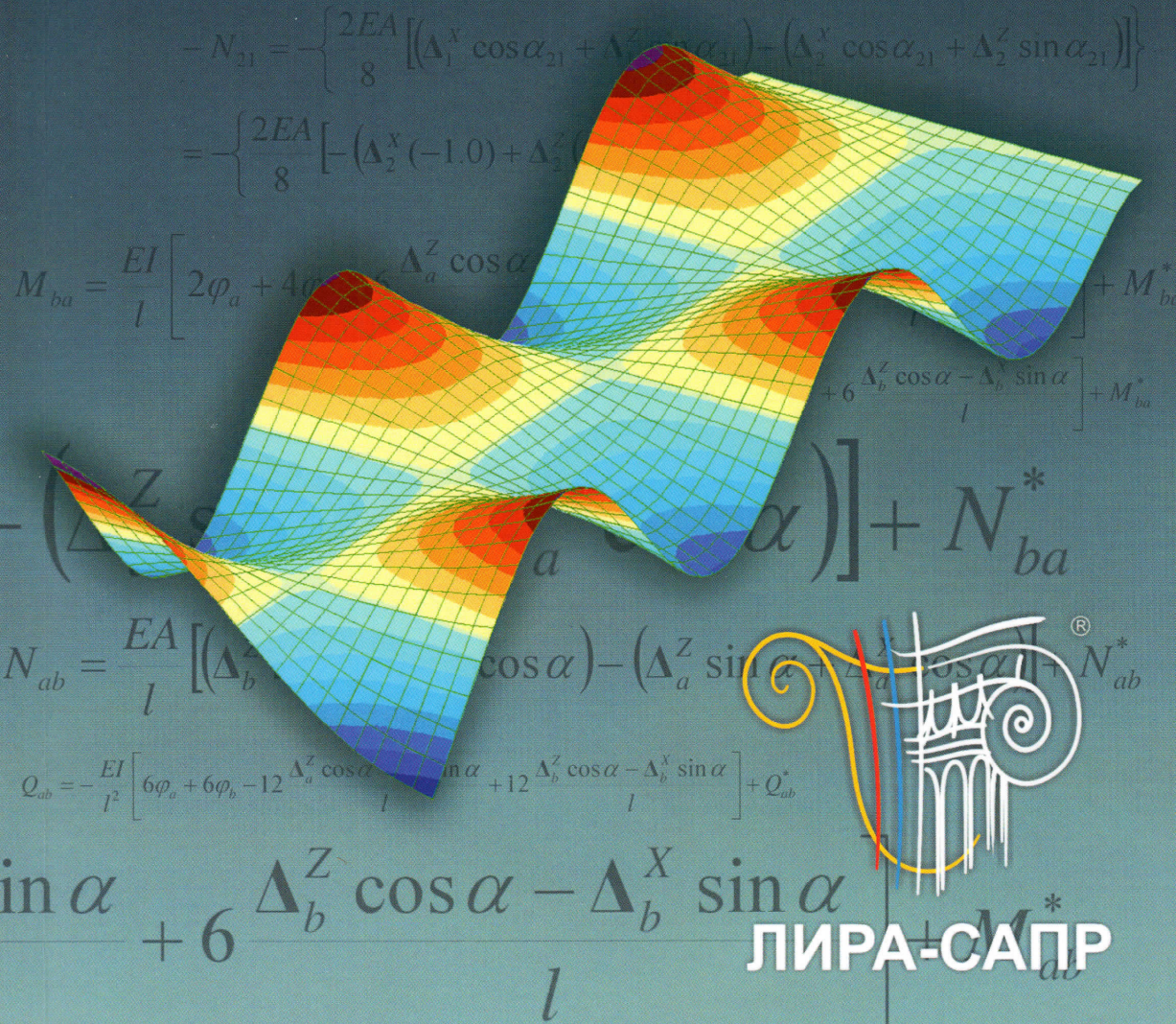


А.С. Городецкий М.С. Барабаш В.Н. Сидоров

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ



А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ
МЕХАНИКИ**



**Издательство АСВ
Москва
2016**

УДК 624.04:004.94
ББК 32.97

Рецензенты:

вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, академик, доктор технических наук, профессор *В.И. Травуш*;

доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» *Т.Л. Дмитриева*

Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н.

Компьютерное моделирование в задачах строительной механики: Учеб. пособие. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 338 с.

ISBN 978-5-4323-0188-8

В учебном пособии приведены теоретические и практические основы компьютерного моделирования применительно к задачам расчета строительных конструкций, представлены особенности решения нелинейных задач, описан инструментарий программного комплекса ЛИРА-САПР. На примерах рассмотрены вопросы составления расчетных схем для решения задач сопротивления материалов и строительной механики.

В приложениях приведены возможные варианты учебных программ для изучения дисциплин «Строительная механика» и «Компьютерное моделирование и автоматизированные расчеты на прочность», а также варианты заданий для лабораторных и расчетно-графических работ по строительной механике.

Книга в первую очередь предназначена для студентов, обучающихся по направлению «Строительство» и по специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также для преподавателей дисциплин «Сопротивление материалов», «Строительная механика», «Теория упругости», «Компьютерные технологии и системы автоматизированного проектирования».

Книга также может быть полезна инженерам, использующим в своей проектной практике компьютерные технологии, аспирантам, исследователям, изучающим работу различных типов конструкций, разработчикам программных средств.

ISBN 978-5-4323-0188-8

© Издательский дом АСВ, 2016

© Городецкий А.С., Барабаш М.С.,
Сидоров В.Н., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	7
<i>Введение</i>	9
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	12
1.1. Путь к компьютерным моделям. Ретроспектива. Возможное развитие.....	12
1.2. Идеализация объекта при создании компьютерной модели.....	17
1.3. Метод конечных элементов	23
1.4. Приемы создания расчетных моделей	29
ГЛАВА 2. РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ – ОСНОВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	37
2.1. Особенности расчета конструкций в нелинейной постановке	37
2.2. Физическая нелинейность	41
2.3. Геометрическая нелинейность.....	43
2.4. Конструктивная нелинейность	44
2.5. Генетическая нелинейность	46
2.6. Моделирование процесса нагружения.....	47
2.7. Моделирование процесса возведения	50
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ЛИРА-САПР	52
3.1. Программные комплексы – основа инструментария компьютерного моделирования.....	52
3.2. Общая схема функционирования программного комплекса ЛИРА-САПР	58
3.3. Библиотека конечных элементов	63
3.4. Процессоры.....	65
3.5. Расчетные сочетания усилий (PCY). Расчетные сочетания нагрузений (PCN).....	71
3.6. Конструирующие системы.....	75
ГЛАВА 4. ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ	77
4.1. Краткое описание ленточного интерфейса ПК ЛИРА-САПР®	77
4.2. Запуск программы и подготовка к созданию расчетной схемы.....	84
4.2.1. <i>Запуск программы ЛИРА-САПР</i>	84

4.2.2. Настройка единиц измерения.....	85
4.2.3. Создание нового проекта для выполнения расчета и его наименование	85
4.3. Создание расчетной схемы стержневой системы для МКЭ-расчета.....	86
4.3.1. Графическое представление расчетной схемы.....	86
4.3.2. Выбор компонентов расчетной схемы.....	90
4.3.3. Информация о компонентах расчетной схемы.....	92
4.3.4. Отображение характеристик расчетной схемы с помощью флагов	95
4.3.5. Редактирование расчетной схемы	97
4.3.6. Упаковка схемы.....	98
4.3.7. Глобальные и локальные координатные оси.....	101
4.3.8. Назначение типа элементов.....	102
4.3.9. Назначение опорных связей	103
4.3.10. Назначение шарниров в узлах элементов.....	104
4.3.11. Назначение жесткостей элементов.....	106
4.3.12. Задание нагрузок.....	109
4.3.13. Расчетные сочетания усилий.....	111
4.3.14. Сохранение расчетной схемы.....	113
4.3.15. Выполнение расчета.....	114
4.4. Автоматизированное документирование результатов расчета.....	115
4.4.1. Понятие о результатах расчета конструкций	115
4.4.2. Компоненты напряженно-деформированного состояния конструкции	116
4.4.3. Инструменты создания документации о результатах анализа напряженно-деформированного состояния.....	118
4.4.4. Создание документации о расчете	123
4.4.5. Передача результатов расчета конструкций в чертежные программы.....	128

ГЛАВА 5. ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ДИСЦИПЛИНАХ «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ» И «СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА». СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ 131

5.1. Лабораторная работа № 1 – расчет сечения.....	132
5.1.1. Расчет сечения аналитическим методом	132
5.1.2. Расчет сечения в ПК ЛИРА-САПР	135
5.2. Лабораторная работа № 2 – расчет составного сечения	141
5.2.1. Расчет сечения аналитическим методом	141
5.2.2. Расчет сечения в ПК ЛИРА-САПР	142
5.3. Лабораторная работа № 3 – расчет составного сечения	150
5.3.1. Расчет сечения аналитическим методом	150

5.3.2. Расчет сечения в ПК ЛИРА-САПР	153
5.4. Лабораторная работа № 4 – расчет балки.....	157
5.4.1. Расчет балки аналитическим методом.....	157
5.4.2. Расчет балки методом конечных элементов с помощью программы Mathcad.....	160
5.4.3. Расчет балки в ПК ЛИРА-САПР.....	169
5.5. Лабораторная работа № 5 – расчет арки.....	177
5.5.1. Расчет арки аналитическим методом.....	177
5.5.2. Расчет арки методом конечных элементов с помощью программы Mathcad.....	179
5.5.3. Расчет арки в ПК ЛИРА-САПР	189
5.6. Лабораторная работа № 6 – расчет фермы	200
5.6.1. Расчет фермы аналитическим методом.....	200
5.6.2. Расчет фермы в ПК ЛИРА-САПР	209
5.7. Лабораторная работа № 7 – расчет рамы.....	215
5.7.1. Расчет рамы аналитическим методом	215
5.7.2. Расчет рамы методом конечных элементов с помощью программы Mathcad.....	225
5.7.3. Расчет рамы в ПК ЛИРА-САПР.....	234
5.8. Лабораторная работа № 8 – расчет рамы на устойчивость.....	240
5.8.1. Расчет рамы на устойчивость в ПК ЛИРА-САПР	240
5.8.2. Расчет стержня на устойчивость в ПК ЛИРА-САПР	243
5.9. Лабораторная работа № 9 – расчет рамы на динамическое воздействие в ПК ЛИРА-САПР	248
5.9.1. Расчет рамы на динамическое воздействие в ПК ЛИРА-САПР	248
5.9.2. Сбор масс аналитическим методом	252

ГЛАВА 6. ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА В ДИСЦИПЛИНЕ «СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА».

ПЛАСТИНЧАТЫЕ СИСТЕМЫ 253

6.1. Лабораторная работа № 1 – расчет толстого цилиндра (плоская деформация).....	253
6.1.1. Расчет толстого цилиндра аналитическим методом.....	253
6.1.2. Расчет толстого цилиндра в ПК ЛИРА-САПР.....	254
6.2. Лабораторная работа № 2 – расчет плиты	262
6.2.1. Расчет плиты аналитическим методом	262
6.2.2. Расчет плиты в ПК ЛИРА-САПР.....	263
6.3. Лабораторная работа № 3 – расчет балки-стенки.....	267
6.3.1. Расчет балки-стенки аналитическим методом	267
6.3.2. Расчет балки-стенки в ПК ЛИРА-САПР.....	268
Литература	275

ПРИЛОЖЕНИЯ 287

Приложение 1	287
Приложение 2	298
Варианты заданий для лабораторных и расчетно-графических работ дисциплины «Строительная механика»	298
<i>Задание к лабораторным работам № 1–3 (глава 5) – расчет составного сечения</i>	298
<i>Задание к лабораторной работе № 4 (глава 5) – расчет балки</i>	302
<i>Задание к лабораторной работе № 5 (глава 5) – расчет арки</i>	303
<i>Задание к лабораторной работе № 6 (глава 5) – расчет фермы</i>	305
<i>Задание к лабораторным работам № 7–9 (глава 5) – расчет рамы</i>	307
<i>Задание к лабораторной работе № 1 (глава 6) – расчет толстого цилиндра (плоская деформация)</i>	309
<i>Задание к лабораторной работе № 2 (глава 6) – расчет плиты</i>	310
<i>Задание к лабораторной работе № 3 (глава 6) – расчет балки-стенки</i>	311
Приложение 3	312
3.1. Расчет балки методом конечных элементов	312
3.2. Расчет арки методом конечных элементов	320
3.3. Расчет рамы методом конечных элементов	329

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная практика инженерного искусства основывается на широком применении компьютерных технологий и численных методов. Это существенно повлияло на смещение акцентов и появление новых подходов в науке «Теория сооружений». В «докомпьютерный» период в расчетах строительных конструкций и сооружений большое внимание уделялось различным приемам для избежания необходимости решения больших систем линейных алгебраических уравнений (метод Красса, метод перераспределения угловых перемещений, различные приемы построения основных схем метода сил и т.д.). Сейчас на первое место выходят методы построения и испытания так называемых адекватных расчетных схем, методы моделирования процессов жизненного цикла конструкций. Это инициировало введение новых направлений подготовки специалистов в ряде Вузов Российской Федерации, таких как «Применение современных расчетных программных комплексов при расчете зданий и сооружений», «Компьютерные технологии в проектировании и оценке безопасности зданий и сооружений» и др. На эти позитивные тенденции ориентированы акценты настоящей книги.

В учебном пособии приведены теоретические и практические основы компьютерного моделирования применительно к задачам расчета строительных конструкций и сооружений, представлены особенности решения нелинейных задач, описан инструментарий программного комплекса ЛИРА-САПР. На конкретных примерах рассмотрены вопросы составления расчетных схем для решения задач сопромата и строительной механики. В современных учебниках и учебных пособиях для высших учебных заведений по дисциплине «Строительная механика» материал излагается в классическом виде на основе аналитических методов расчета и не в должной мере уделяется внимание особенностям составления расчетных схем.

Основная цель данного учебного пособия заключается в преподавании технологий математического моделирования и численно-аналитических методов расчета конструкций. Для достижения этой цели за основу взяты простые конструкции, которые рассчитываются при решении задач в дисциплинах «Соппротивление материалов» и «Строительная механика». Расчеты выполняются традиционными аналитическими подходами «вручную», с помощью программы Mathcad и с использованием распространенного программного комплекса ЛИРА-САПР. При анализе результатов расчетов производится сопоставление и выполняется оценка погрешности при различных подходах к расчету. Такое сопоставление, по мнению авторов, поможет студентам, а также инженерам при синтезе и анализе компьютерных моделей конструкций и осознавать физический смысл, и формировать инженерное понимание сути полученных результатов. По мнению авторов, учебное пособие поможет подготовке специалиста, способного применять и совершенствовать методы расчета конструкций, зданий и сооружений на различные виды воздействий с помощью современных компьютерных технологий и в дальнейшем использо-

вать полученные знания для проведения компьютерного моделирования жизненного цикла конструкций.

Авторы выражают благодарность П.Н. Кирьяеву, Д.В. Медведенко, М.А. Ромашкиной, Е.И. Торбенко, без квалифицированной помощи которых издание пособия было бы невозможным.

Улучшению содержания рукописи в значительной мере способствовали замечания и советы рецензентов: доктора технических наук, профессора, вице-президента РААСН, заслуженного деятеля науки Российской Федерации Владимира Ильича Травуша и доктора технических наук, профессора кафедры сопротивления материалов и строительной механики Иркутского национального исследовательского технического университета Татьяны Львовны Дмитриевой, которые были учтены при подготовке окончательного варианта рукописи. Им авторы выражают свою искреннюю благодарность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время насущной необходимостью для будущих инженеров становится владение компьютерными технологиями расчета и проектирования конструкций зданий и сооружений. Но практически отсутствуют учебные пособия по компьютерному моделированию стержневых и пластинчатых конструкций, рассматриваемых в курсах «Сопrotивление материалов», «Строительная механика», с использованием общепринятых аналитических методов. В то же время проектные работы выполняются с использованием компьютерных технологий, поэтому целесообразно осваивать специальные знания по использованию программных комплексов параллельно с изучением фундаментальных дисциплин. В настоящем пособии излагаются численно-аналитические методы расчета балок, аркок, рам, расчета рам на устойчивость и динамические воздействия, численно-аналитические методы расчета цилиндрических конструкций, плит, балок-стенок.

Опыт показывает, что отсутствие преподавания специальных компьютерных технологий уже на начальных курсах в целом негативно сказывается на дальнейшем учебном процессе, курсовом и дипломном проектировании, а также на работе выпускников вузов на производстве. Авторы предприняли попытку ликвидировать этот недостаток. Учебное пособие написано в тесном сотрудничестве с разработчиками весьма распространенного в проектной и конструкторской практике программного комплекса с учетом всех нюансов использования такого программного комплекса для решения задач строительной механики.

Содержание учебного пособия соответствует программе курса «Строительная механика», а также может быть использовано при изучении дисциплин «Компьютерное моделирование и автоматизированные расчеты на прочность», «Основы САПР», «Компьютерные технологии в строительстве», «Компьютерные методы в динамическом расчете зданий и сооружений» и смежных им дисциплин, преподаваемых в строительных учебных заведениях при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов по направлению «Строительство». Кроме того, учебное пособие может использоваться для подготовки студентов по другим направлениям в высших учебных заведениях строительного и общетехнического профиля.

Учебное пособие состоит из 6 глав и приложений. Первая, вторая, третья главы написаны А.С. Городецким, М.С. Барабаш, четвертая глава написана М.С. Барабаш, пятая, шестая главы написаны М.С. Барабаш, В.Н. Сидоровым.

В главе 1 рассматриваются ретроспектива, вопросы идеализации объекта при создании его компьютерной модели, ряд приемов создания расчетных схем, теоретические основы метода конечных элементов, возможные пути развития компьютерных технологий.

Глава 2 содержит описание особенностей и методики расчета конструкций в нелинейной постановке, что является основой современных методов модели-

рования процессов изменения напряженно-деформированного состояния в конструкциях на протяжении их жизненного цикла.

Глава 3 посвящена компьютерной реализации, особенностям библиотеки конечных элементов, расчетным процессорам программного комплекса (ПК) ЛИРА-САПР, особенностям составления расчетных сочетаний усилий (PCY) и расчетных сочетаний нагрузок (PCN) при построении расчетных моделей конструкций.

В главе 4 кратко изложена технология подготовки моделей конструкций в среде ПК ЛИРА-САПР (вполне достаточное для того, чтобы студент мог самостоятельно строить конечно-элементные расчетные модели конструкций). Последовательно излагаются приемы визуализации результатов расчета, их анализ и способы автоматической генерации документации, содержащей результаты расчета.

Главы 5 и 6 включают примеры численно-аналитических методов расчета стержневых и пластинчатых конструкций. Подробно представлен расчет «вручную», описывается процесс расчета методом конечных элементов с использованием программы Mathcad, пошагово описывается процесс формирования расчетной модели в программном комплексе ЛИРА-САПР, а также анализа полученных результатов. Главы написаны в рамках учебной программы дисциплины «Строительная механика», которая является идентичной в большинстве строительных высших учебных заведений. Навыки, полученные студентом при выполнении лабораторных работ, представленных в этих главах, будут способствовать успешному выполнению курсовых проектов дисциплин «Железобетонные конструкции», «Металлические конструкции», в дипломном проектировании, при расчетах промышленных и гражданских зданий. Для всех приведенных задач предусмотрено сравнение результатов расчета.

Авторы предполагают издание последующих взаимосвязанных книг для изложения курсов «Железобетонные конструкции» и «Стальные конструкции».

Выполняя роль учебного пособия, книга содержит много определений, пояснений терминов и понятий, относящихся к методу конечных элементов, технологии автоматизации проектирования, структуре программного комплекса.

Чтобы облегчить поиск нужной информации, авторы пользовались несколькими приемами выделения текста, прежде всего изменением шрифта. Команды ПК ЛИРА-САПР и их опции выделяются в тексте полужирными строчными буквами шрифта. Таким же шрифтом выделены в тексте названия выпадающих меню, диалоговых окон и других управляющих элементов. Применены специальные разделяющие знаки препинания для однотипных частей текста, следующих одна за другой. Очень часто в ПК ЛИРА-САПР для осуществления какой-либо операции требуется выполнить несколько команд, несколько шагов. В перечне действий, необходимых для выполнения операции, мы используем символы, обозначающие очередной шаг, команду, операцию.

В заключение аргументируем, почему пособие посвящено именно программному комплексу ЛИРА-САПР. Одной из причин является тот факт, что

этот программный комплекс применяется специалистами Российской Федерации и стран СНГ в учебных целях, научной работе и проектной практике с конца 60-х гг. прошлого столетия. Во-вторых, программный комплекс ориентирован на решение задач расчета и проектирования в первую очередь строительных конструкций. Программный комплекс в полном объеме реализует нормативы России, Украины, Белоруссии, Казахстана, Киргизии и учитывает традиции проектирования на постсоветском пространстве. ПК ЛИРА-САПР непрерывно развивается по таким основным направлениям, как совершенствование пользовательского интерфейса, наукоемкость, развитие конструирующих систем. Разработчики ПК ЛИРА-САПР большое внимание уделяют удобству и эффективности работы пользователей с комплексом. Об этом свидетельствует и развитая система сопровождения (консультации, обучения, интернет-форумы), реализация предложений пользователей, научных направлений, связанных с проводимыми ими исследованиями; большое количество публикаций и инструктивных материалов. Также ПК ЛИРА-САПР поставляется во все высшие учебные заведения в комплекте ACADEMICset, включающей сетевую лицензию на 20 рабочих мест и локальное место преподавателя. Кроме того, студентам доступна свободно распространяемая версия от разработчика ПК ЛИРА-САПР 2013 (www.liraland.ru), которую студенты могут использовать наравне с ACADEMICset для выполнения учебных заданий, а также курсовых и дипломных работ.

Учебное пособие

Александр Сергеевич Городецкий

Мария Сергеевна Барабаш

Владимир Николаевич Сидоров

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Компьютерная верстка: *Д.А. Матвеев*

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*

Дизайн обложки: *Т.А. Негророва*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Подписано к печати 19.07.16.
Формат 70x100/16. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Усл. 21,125 п.л. Тираж 500 экз. Заказ № 107399.

ООО «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское шоссе, 19,
отдел реализации оф. 12, тел., факс: +7(925)084-74-24;
e-mail: iasv@iasv.ru, <http://www.iasv.ru/>

Отпечатано: ПАО «Т 8 Издательские Технологии»
109316 Москва, Волгоградский проспект, дом 42, корпус 5
Тел.: 8 495 221-89-80