

Применение численного моделирования при проектировании технологии обогрева и выдерживания бетона монолитных конструкций

К.т.н., старший преподаватель Л.В. Зиневич,
ГОУ Московский государственный строительный университет*

Ключевые слова: монолитное строительство; зимнее бетонирование; обогрев и выдерживание бетона; температурно-прочностное прогнозирование состояния монолитного бетона в раннем возрасте; программное обеспечение; МКЭ анализ; ELCUT.

Процессы технологического обеспечения обогрева и выдерживания бетона относятся к основной группе работ по изготовлению монолитных железобетонных конструкций в построечных условиях и во многом определяют их конечные свойства и общее качество возводимого здания по критериям долговечности и надежности [1, 2]. Первым этапом подготовки этих процессов для любого объекта является проработка специальных технологических регламентов на обогрев и выдерживание бетона на стадии разработки ППР. Здесь определяются способы обогрева и выдерживания монолитных конструкций, конкретные режимы, обеспечивающие достижение необходимой прочности бетона к моменту их распалубивания или загрузки, конкретизируются правила выполнения работ при тепловой обработке бетона на объекте, определяется потребность в ресурсах.

В условиях современной строительной практики стало очевидно, что использование традиционных типовых решений [3, 4] не может являться конкурентным и удовлетворяющим растущий спрос на индивидуальные решения, учитывающие особенности применяемых технологий и всё многообразие реальных условий. В то же время проектировщикам до сих пор так и не удалось уйти от недостаточной проработки вопросов тепловой обработки бетона и перепечатки общих сведений и правил. И основная причина здесь – практически полное отсутствие простых и доступных инструментов, позволяющих автоматизировать расчёты теплотехники ограждений, электротехники обогрева, а также сложные и трудоёмкие расчёты температурно-прочностного состояния бетона в монолитных конструкциях.

Повышение качества проектной технологической документации по обогреву и выдерживанию монолитных конструкций становится возможным в результате широкого применения моделирования температурно-прочностного поведения бетона в конструкциях с одновременным подбором характеристик ограждений и нагревателей. На основе такого рода расчётов становится возможной разработка комплекса технологических мероприятий, обеспечивающих благоприятные условия для твердения бетона с требуемой по технологии строительства интенсивностью. Создаются также предпосылки к проработке и внедрению целого ряда новых разделов регламентов [1, 5].

Задачу постановки и реализации методов компьютерного моделирования температурно-прочностного состояния бетона пытались решить многие исследователи [6-13], однако эти наработки в большинстве своём методологически раздроблены и не получили распространения. Тем не менее, общим устойчивым направлением является разработка небольших независимых специализированных компьютерных приложений, в которых основной концепцией расчёта теплового состояния конструкций служит стандартная методика расчета на основе уравнения общего теплового баланса.

Практически полное отсутствие методов конечных разностей, объёмов или элементов можно объяснить значительными сложностями при описании геометрии конструкции и начальных условий, при интерпретации полученных данных, что тесно связано с простотой, надёжностью и конкурентоспособностью локальной специализированной программы. Использование именно независимых разработок также связано со специфичностью вопроса и сложностью, излишней функциональностью и высокой ценой универсальных расчётных комплексов [14, 15], на базе которых можно строить специализированный расчёт.

С учётом указанных причин автором в своё время также была разработана компьютерная программа для расчёта параметров обогрева и моделирования температурно-прочностного состояния бетона на основе уравнения общего теплового баланса (название ThermoBeton). Использование программы снимало проблему трудоёмкости расчетов, а возможность моделирования позволяла оценить многие технологические оттенки обогрева и выдерживания бетона. Например, границы применимости режимов при различной температуре наружного воздуха, возможность и режимы тепловой обработки разнородных конструкций в едином цикле управления обогревом и целый ряд других. При этом одно из неперемных условий – представление результатов расчетов в графическом виде, доступном для быстрого анализа и понимания ситуаций.

Однако решение на основе уравнения общего теплового баланса не позволяет получить показатели в каждой точке конструкции и не может использоваться для сложных задач, требующих анализа поля. Этот вопрос определённым образом был решён при разработке специализированной программной надстройки для ELCUT – универсального отечественного пакета двумерного полевого моделирования с использованием МКЭ (разработчик ПК TOP) [16]. Остановимся подробнее на том, почему в качестве платформы был выбран именно этот расчётный пакет, и каким образом выполняется расчёт обогрева и выдерживания бетона конструкций с применением ELCUT и WinConcret (название надстройки).

В качестве платформы для специализированных расчётов ELCUT был выбран не случайно. Во-первых, он прост, не требователен к ресурсам, не зависит от других CAE/CAD приложений, даёт надёжные результаты, изначально русскоязычный и имеет отличную службу поддержки, не дорого стоит и имеет бесплатный «Студенческий» вариант. Во-вторых, содержит необходимые для выполнения расчётов по выдерживанию бетона модули – переменного тока, нестационарной теплопроводности, упругих напряжений и деформаций, а также обладает гибкостью – позволяет использовать себя в качестве платформы сторонними приложениями. Самостоятельная значимость и модульность ELCUT при этом также играют важную роль.

WinConcret реализует только дополнительные функции, которых не хватает ELCUT для осуществления расчётов по обогреву и выдерживанию бетона. К таким основным функциям можно отнести:

- определение тепловыделения и прочности бетона (с учётом данных по величине, кинетике тепловыделения и твердения бетона, расходу цемента);
- коррекция мощности активных источников тепла (с учётом КТС нагревателя, с учётом изменения сопротивления бетона при электропрогреве);
- инструменты регулирования длительности прогрева, длительности существования съёмных ограждений.

Таким образом, используя ELCUT и надстройку WinConcret, конечный пользователь получает в своё распоряжение все возможности и преимущества ELCUT как самостоятельного продукта, а также дополнительные функции для осуществления расчётов по выдерживанию бетона, реализуемые через WinConcret. Расчёт выдерживания бетона при этом обычно происходит в два этапа:

- формирование и решение обычной задачи ELCUT (нестационарной теплопередачи, начальные условия по температуре задаются обычно связанной стационарной задачей теплопередачи);
- уточняющий расчёт, то есть учитывающий специфику выдерживания бетона. Этот расчёт запускается из надстройки WinConcret после внесения в ней основных данных для уточняющего расчёта, а также параметров самого расчёта (это занимает не более двух минут). Удобно также то, что WinConcret запускается из самого ELCUT как встроенная функция.

Здесь нужно отметить, что, с учётом вида возможного программного взаимодействия с ядром ELCUT, в основе уточнения расчёта лежит модификация исходной задачи и решение серии таких модифицированных последовательно связанных задач. При этом твердеющий бетон разбивается прямоугольной сеткой дискретизации на блоки с КЭ сеткой, в которых могут быть заданы различные свойства, постоянные в пределах конкретного блока и на временном шаге, а временной шаг модификации свойств в блоках равняется шагу решения отдельной задачи серии.

Результатом уточнённого решения являются:

- данные изменения температуры и прочности бетона во времени для каждого блока и всего твердеющего бетона модифицированной модели в виде привычного температурно-прочностного графика, доступные в интерпретации WinConcret;
- все остальные показатели, существующие и доступные в интерпретации ELCUT для каждого из моментов времени (то есть для каждой из решённых модифицированных задач).

Совместную работу ELCUT и надстройки рассмотрим на примере проектирования технологии выдерживания реального рамного фундамента Уренгойской ГЭС.

1 этап. Постановка задачи, формирование расчётной модели, задание свойств, решение исходной задачи. Основной задачей теплового расчёта для массивной конструкции является анализ температурного поля в её сечении и разработка технологических мероприятий, выравнивающих это поле и одновременно обеспечивающих благоприятную абсолютную температуру твердения бетона конструкции.

В силу двумерности ELCUT расчёт режима фундамента произведён для каждого из характерных участков, который в плоскопараллельной постановке был представлен соответствующим сечением. Однотипные конструкции со схожими габаритами сечений могут выдерживаться в одном технологическом цикле, поэтому расчёт режима таких конструкций был выполнен в одной задаче (то есть в расчётную модель были помещены сечения сразу всех таких конструкций). На рис.1. показана расчётная геометрическая модель ELCUT с сечениями рассматриваемых ригелей рам.

Зиневич Л.В. Применение численного моделирования при проектировании технологии обогрева и выдерживания бетона монолитных конструкций

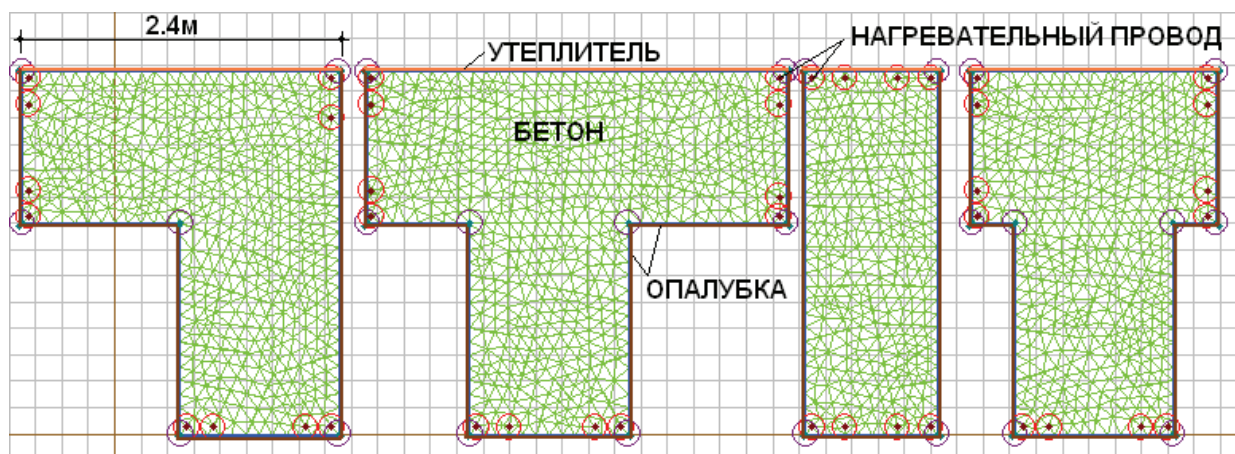


Рисунок 1. Исходная расчётная геометрическая модель ригелей

Здесь помимо сечения самих конструкций указана используемая опалубка и утеплитель. Также для выравнивания температурного поля предусмотрен локальный прогрев бетона конструкций нагревательным проводом (в модели указан в виде точек – следов точечных линейных нагревателей).

Из основных особенностей формирования задачи для первого «прикидочного» расчёта отметим только следующее. Для вершин нагревательного провода задаётся начальная, а не расчётная погонная нагрузка, то есть при 20°C, например 40Вт/пм. Это связано с температурным сопротивлением нагревателей [17], которое будет учтено при последующем уточняющем расчёте. Тепловыделение бетона ELCUT считать самостоятельно не умеет, поэтому объёмные источники на этом этапе можно не указывать. В то же время, используя возможность ELCUT задавать источник как функцию времени или координат, тепловыделение бетона можно представить функцией времени при средней ожидаемой температуре твердения. С учётом известных данных [18], эту функцию для ELCUT можно привести к виду:

$$Z * Q_{max} * (1 - (Bt * (t/3600) + 1) * \exp(-Bt * (t/3600))) / ((t+1)/3600) / 36, \text{ Вт/м}^3,$$

где Z – расход цемента (принят 350кг/м³);

Q_{max} – максимальное тепловыделение цемента (для бетона на ПЦ400 принято равным 335кДж/кг);

Bt – коэффициент интенсивности тепловыделения при температуре бетона (для +20°C принято равным 0,04);

t – переменная времени Elcut, сек.

2 этап. Уточняющий расчёт. В WinConcret задаётся бетон, указываются нагреватели, время прогрева, при необходимости – время существования ограждений, а также параметры расчёта: шаг интегрирования, шаг задач серии, степень дискретизации на блоки при специализированном расчёте, после чего запускается сам расчёт.

3 этап. Анализ данных. Анализируя состояние поля (рис. 2б), можно судить о приемлемости технологического решения по выдерживанию бетона конструкций. В данном случае показано температурное поле в момент времени и графики во времени температурно-прочностного состояния бетона конструкций в отдельных точках (блоках). В зависимости от целей анализа также можно построить поле градиентов или теплового потока, решить дополнительно задачу температурных напряжений и деформаций для рассматриваемого фрагмента.

Файлы этой задачи, а также других примеров задач и более подробное описание решения основных типов задач в технологии выдерживания бетона, можно найти на сайте поддержки программы WinConcret.ru, о программе Elcut также можно узнать на одноимённом сайте.

Таким образом, благодаря выполненным «специализированным» разработкам и их доступности, как в освоении, так и в цене, для рядовых инженеров-проектировщиков появилась реальная возможность моделирования температурно-прочностного состояния монолитного бетона в конструкциях на ранних сроках его твердения. При этом исследование вопросов выдерживания монолитного бетона – это лишь небольшая часть задач технологического проектирования в строительстве, которая может быть решена с помощью простого и быстрого программного пакета Elcut. Поэтому мы надеемся, что численное моделирование станет для инженеров-проектировщиков хорошей практикой, нежели приятным исключением.

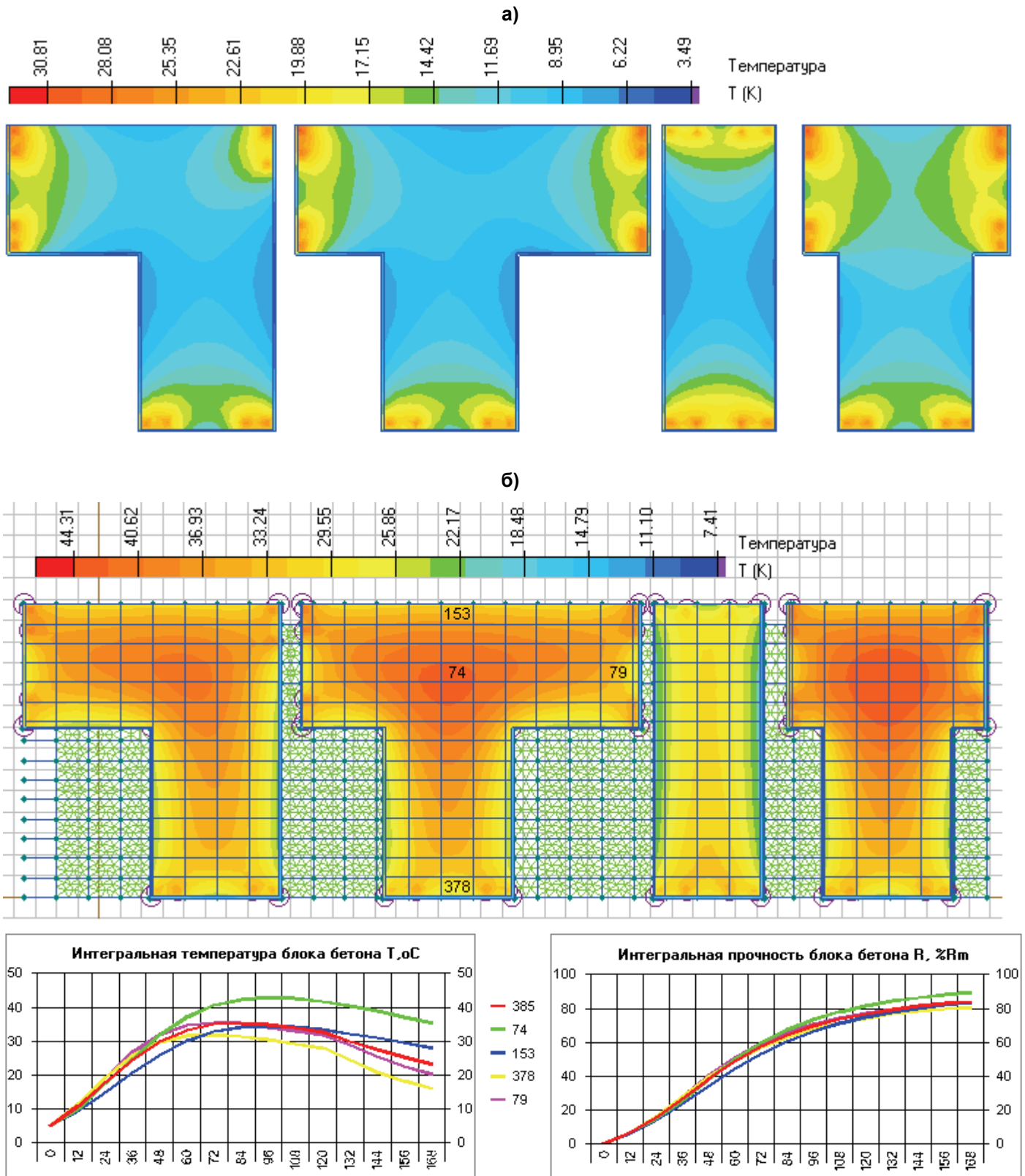


Рисунок 2. Температурное поле в сечении ригелей на 4 день с начала выдерживания:
а) результат первого прикидочного расчёта;
б) результат второго уточняющего расчёта с наложением на модифицированную геометрическую модель (прим.: поз. 385 – интегральная по всем конструкциям температура-прочность)

Автор выражает благодарность участникам рассмотренных проектов: Николаеву Ф.Н. (МГУ), Комиссарову С.В. (МГСУ), а также команде разработчиков и группе поддержки пользователей программы ELCUT (ПК TOP) за оказанную помощь при разработке и поддержке проекта WinConcret.

Литература:

1. Ремейко О. А., Журов Н. Н., Виноградов Ю. К. Технологическое сопровождение всесезонного монолитного строительства // Обеспечение качества несущих конструкций при всесезонном монолитном домостроении : по материалам семинара-совещания «Монолитное домостроение: отечественная и зарубежная опалубка, способы ведения работ» (Москва, 20 апреля 2000г) / ГУ Мосстройлицензия. М. , 2000. С. 5-8.
2. Зиневич Л. В., Галумян А. В. Скоростное монолитное домостроение: условия достижения высоких темпов строительства и качества бетона получаемых конструкций // Бетон и железобетон. 2009. № 5. С. 23-26.
3. МДС 12-48.2009. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов / ЗАО ЦНИИОМТП. М., 2009.
4. ACI 306R Cold Weather Concreting. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 1982, 1989, 2000 and 2010, 26 p.
5. Журов Н. Н., Комиссаров С. В., Ремейко О. А. Информационное обеспечение качества ответственных монолитных железобетонных конструкций при зимнем бетонировании // Справочник строитель. 2002. №6. С. 15-18.
6. Журов Н. Н., Комиссаров С. В. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте // Вестник МГСУ. 2010. №4. Том 5. С. 296-300.
7. Зиневич Л. В. Электропрогрев бетона: теория и практика применения и расчёта // сб. науч. тр. Тринадцатой международной межвузовской научно-практической конференции молодых учёных, докторантов и аспирантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 14-21 апреля 2010г) / МГСУ, РНТО, АСВ, РААСН, РАЕН. М. : Изд-во АСВ. 2010. С. 94-96.
8. Головнёв С. Г. [и др.] Компьютерный контроль и регулирование процессов выдерживания бетона в зимних условиях // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2010. №2. С. 75-78.
9. Доладов М. Ю., Доладов Ю. И. Программа для расчета обогрева бетона при зимнем бетонировании // Строительный вестник Российской инженерной академии. 2006. Выпуск 7. С. 52-56.
10. Трёмбицкий С. М., Беккер Л. Н., Кебадзе П. Г. Условия достижения высоких темпов и качества строительства зданий из монолитного железобетона // Бетон и железобетон. 2008. №5. С. 8-11.
11. Гныря А. И., Курец В. И. [и др.] Методика определения электротепловых полей в системе «электрод – бетонная смесь» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 1. С. 141-145.
12. Титов М. М. Методика электротехнического расчёта устройств для электроразогрева бетонной смеси // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 4. С. 152-161.
13. Никоноров С. В., Байбурин А. Х., Кнутарева Н. В. Методика расчёта технологических параметров метода «термоса», обеспечивающая гарантированный набор прочности бетона // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2005. № 13. С. 79-80.
14. Алямовский А. А. [и др.] SolidWorks – компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб. : БХВ Петербург, 2005. 799 с.
15. Рыжов С. А. ABAQUS – многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа // САПР и графика. 2003. №1. Доступ из сети Интернет URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=6736&iid=275> (дата обращения: 14.03.2011).
16. Дубицкий С. Д., Поднос В. Г. ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей // CADmaster. 2001. №1. С. 17-21.
17. Руководство по конструкциям опалубок и производству опалубочных работ / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. М. : Стройиздат. 1983. 250 с.
18. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса / НИИЖБ Госстроя СССР. М. : Стройиздат. 1975. 192 с.

** Людмила Владимировна Зиневич, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(903)163-32-79; эл. почта: zlv-com@ya.ru*