

Сергей Николаевич ЛЕОНОВИЧ,
доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
"Технология строительного
производства"
Белорусского национального
технического университета

Игорь Валерьевич КОВАЛЬ,
кандидат технических наук,
заведующий отделом
"Технология бетонов и растворов"
РУП "Институт БелНИИС"

**Дмитрий Андреевич
ЛИТВИНОВСКИЙ**,
аспирант кафедры
"Технология бетона
и строительные материалы"
Брестского государственного
технического университета

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА

EFFECTS OF SPECIFIC ENERGY EXPENDITURES ON QUASI-STATIC FAILURE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE UNDER INCREASING TEMPERATURE

В статье приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} и поперечном сдвиге K_{IIC} высокопрочного бетона при воздействии высоких температур. Исследовано влияние изменения удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение бетона при увеличении температуры нагрева.

This article presents the results of the experimental study of the pressure intensity factors obtained at normal separation K_{IC} and lateral displacement K_{IIC} of high-strength concrete under conditions of high temperatures. The specific energy expenditures affecting the quasi-static failure of concrete under increasing temperature have been studied.

ВВЕДЕНИЕ

Высокопрочный бетон обладает значительными преимуществами по сравнению с обычным.

Установлено, что свойства бетона существенно изменяются под воздействием высоких температур. Влияние температуры различно: химические изменения и перемещение влаги в цементном растворе; тепловое повреждение (микроразрушение) от температурных градиентов и деформационных несовместимостей между заполнителем и цементным камнем.

Наибольшее влияние на снижение прочности бетона оказывает температура его нагрева [1]. Вместе с тем прочность бетона зависит от свойств составляющих его материалов и протекающих структурообразующих и деструктивных процессов. Проблема анализа состава бетонной смеси затруднена сложностью происходящих при нагревании процессов [2], поскольку для различных температурных интервалов значимость влияния составных элементов композиций меняется.

Что касается взрывного растрескивания, которое подразумевает внезапное и резкое отслаивание поверхностного слоя нагретого бетона, было замечено в лабораторных испытаниях, что высокопрочный бетон имеет значительный потенциал взрывного растрескивания даже при скорости нагревания 2 °С/мин. Данное явление однако наблюдалось непоследовательно.

Причиной хрупкого разрушения является образование трещин в структуре бетона и их переход в неравновесное спонтанное развитие под воздействием сжимающих напряжений от внешней нагрузки, неравномерного нагрева по толщине сечения элемента и растягивающих напряжений от фильтрации пара. Разрушение бетона начинается при достижении кри-

тической нагрузки, почти мгновенном росте неравномерной трещины и происходит по цементному камню и контактной зоне.

При температуре свыше 400 °С происходит усиление деструктивных процессов в бетоне. При нагреве постепенно возникают и развиваются микротрещины. Результаты исследований М. А. Riley [3] позволяют сделать вывод, что при нагреве до температуры 300 °С трещины образуются только на границе цементного камня и заполнителя, при температуре 300 °С–500 °С — в цементном камне, при температуре 500 °С и выше идет активное развитие трещин по всей структуре бетона. Данные процессы в основном объясняются разностью температурных деформаций цементного камня и заполнителей вследствие того, что затвердевший цемент, обезвоживаясь, дает усадку, а зерна заполнителя расширяются. Это увеличивает деформации ползучести, что еще в большей мере снижает прочность бетона. При температуре 400 °С–600 °С в результате удаления из цементного камня химически связанной воды нарушается структура бетона, вследствие дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Далее происходит ослабление контакта цементирующей массы с крупным и мелким заполнителями, микротвердость бетона в контактной зоне снижается [4]. Процессы, происходящие в данной зоне, обусловлены влиянием величин температурных деформаций цементного камня и заполнителей, а также дегидратацией клинкерных минералов цементного камня. При нагревании бетона в интервале 600 °С–800 °С температурная усадка цементного камня при одновременном расширении заполнителей усиливается, еще больше нарушая связи между ними, что приводит к разрыву цементного скелета на отдельные части.

Модификационные превращения кристаллического кварца сопровождаются увеличением его объема и дополнительным снижением прочности заполнителя и бетона в целом.

Учитывая многие преимущества высокопрочного бетона и увеличение его использования в строительстве, необходимо понять фундаментальное поведение высокопрочного бетона при повышенных температурах, чтобы гарантировать безопасность проектирования с учетом использования такого бетона.

**МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ**

Испытательные образцы были изготовлены из смеси высокопрочного бетона с учетом требований ГОСТ 10180. Смесь была изготовлена из местного сырья (цемент, щебень, песок) с добавлением пластифицирующей добавки первой группы по СТБ-1112 ГП-1 и активной минеральной добавки ультрадисперсного микрокремнезема МК (В/Ц = 0,28). Размеры образцов-кубов — 100x100x100 мм.

Для проведения исследований коэффициентов интенсивности напряжения при нормальном отрыве и поперечном сдвиге применяли образцы двух типов (рис. 1). Надрезы наносились при помощи режущего инструмента (диск с алмазным напылением) после полного прогрева в остывшем состоянии.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ
И ПОПЕРЕЧНОМ СДВИГЕ**

Закономерности сопротивления образованию и развитию трещин исследуются методами механики разрушения. В качестве основного метода исследования трещиностойкости бетона и вязкости его разрушения (в рассматриваемом эксперименте) принят метод неравновесных испытаний по ГОСТ 29167.

Неравновесные испытания характеризуются потерей устойчивости процесса деформирования образца в момент локализации деформации по достижении максимальной нагрузки, с соответствующим динамическим развитием магистральной трещины.

Определяемые характеристики трещиностойкости (наряду с другими характеристиками механических свойств) используют для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества бетонов;
- сопоставления бетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- анализа причин разрушений конструкций.

Образцы-кубы без предварительной нагрузки нагревались в печах до заданных температур. Скорость нагрева образцов составляла 2 °С/мин с последующим изотермическим прогревом в течение четырех часов. После полного прогрева кубы остывали до комнатной температуры.

Для определения коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} использова-

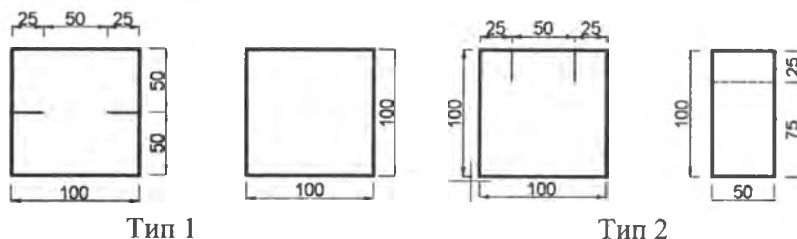


Рис. 1. Опытные образцы

лись образцы 1-го типа с двумя надрезами — инициаторами трещины.

Для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях образцы испытывали на внецентренное сжатие в прессе с помощью двух опор из металлических брусков (рис. 2).

Разрушение образцов происходило неустойчиво по плоскости движущейся трещины между двумя надрезами.

Расчет коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} производили по формуле ГОСТ 29167:

$$K_{IC} = \frac{P}{Bd^{3/2}} \left[18,3 \left(\frac{a}{d} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{d} \right)^{3/2} + 3445 \left(\frac{a}{d} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{d} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{d} \right)^{9/2} \right] \quad (1)$$

где P — нагрузка, при которой происходит разрушение, МН;
 $B = 0,1$ м — ширина образца;
 $d = 0,1$ м — высота образца;
 $a = 0,025$ м — глубина надрезов.

Трещиностойкость бетона при поперечном сдвиге определяли при испытании на срез образцов 2-го типа

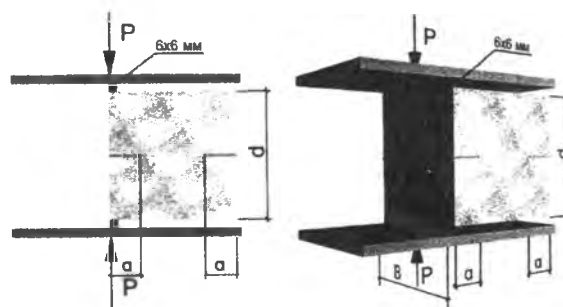


Рис. 2. Схема испытаний образцов 1-го типа

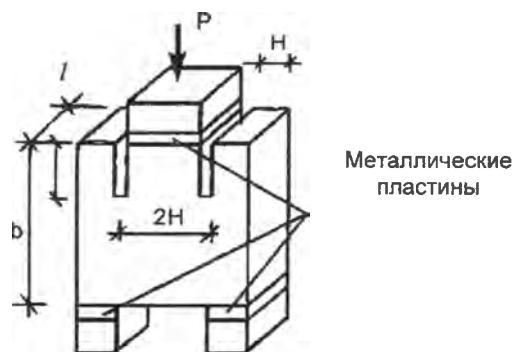


Рис. 3. Схема испытаний образцов 2-го типа

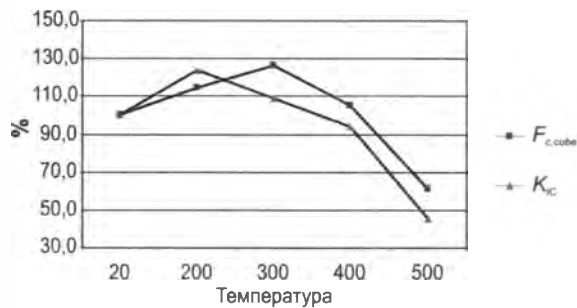


Рис. 4. Изменение значения прочности и K_{IC} с ростом температуры

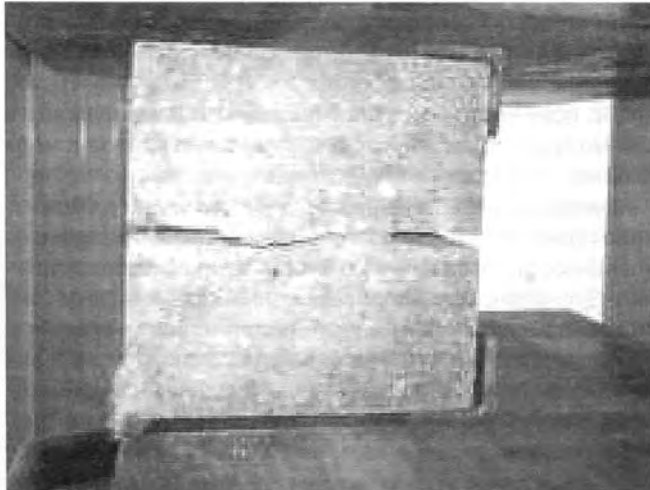


Рис. 5. Разрушение бетонного образца при испытании на нормальный отрыв



Рис. 6. Разрушение бетонного образца при испытании на поперечный сдвиг

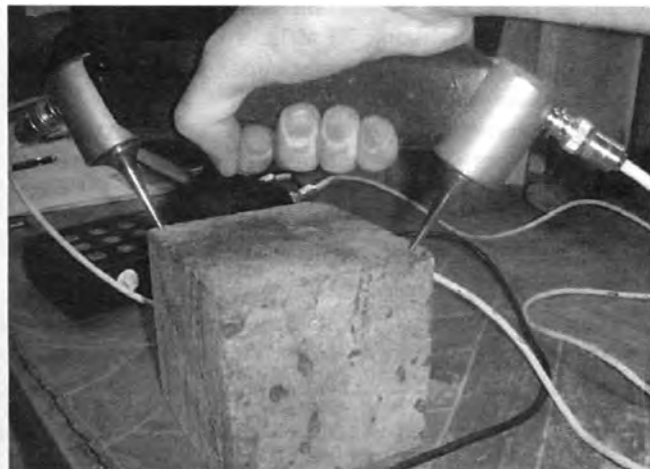


Рис. 7. Измерение скорости распространения ультразвука

Таблица 1. Изменение прочности и коэффициентов K_{IC} и K_{IIc} в зависимости от температуры

Температура, °C	$f_{c,28}$, МПа	K_{IC} , МН/М ^{3/2}	K_{IIc} , МН/М ^{3/2}
20	87,50	0,71	4,00
200	100,00	0,78	5,54
300	102,90	0,74	6,07
400	92,10	0,63	5,55
500	53,55	0,31	4,83

в виде плиты с двумя параллельными надрезами, которые испытывались с помощью опор из металлических прокладок (рис. 3).

Большим преимуществом данного испытания является то, что образец 2-го типа в виде плиты возникает при испытании образца 1-го типа — куба (2 шт.). Таким образом, коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} и поперечном сдвиге K_{IIc} определяются не на образцах-близнецах, а на одном фрагменте бетона.

Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге рассчитывался по формуле

$$K_{IIc} = \frac{P}{2tH} \cdot \sqrt{Y(l,b)}, \quad (2)$$

где P — разрушающая нагрузка, МН;

$Y(l,b)$ — поправочный коэффициент, равный 0,97;

$t = 0,05$ м — ширина образца;

$H = 0,025$ м — ширина плеча.

Изменения значений прочности и коэффициентов K_{IC} и K_{IIc} с ростом температуры представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Испытание образцов с иницирующими надрезами показывает на увеличение прочности бетона при нагреве до температуры 300 °C, а с увеличением прогрева до температуры 400 °C происходят разрушительные процессы с уменьшением достигнутой прочности.

На рис. 5 и 6 показано разрушение бетонного образца при испытании на нормальный отрыв и поперечный сдвиг соответственно.

По результатам проведенных испытаний можно заключить, что метод неравновесных испытаний кубов с иницирующими надрезами дает вполне адекватную картину трещиностойкости и вязкости разрушения высокопрочного бетона при высоких температурах.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

К достоинствам ультразвукового импульсного метода (неразрушающего контроля) относится прохождение ультразвука в объеме бетона, а также высокая в сравнении с другими методами чувствительность к структурным нарушениям — микро- и макротрещинам, оперативность (при использовании современной аппаратуры) [5].

Неразрушающий контроль бетона в процессе испытаний ультразвуковым методом производился в соответствии с требованиями ГОСТ 26134 и ГОСТ 17624 на каждом уровне прогрева поверхностным прозвучиванием.

Зафиксирован различный характер изменения скорости распространения ультразвука и динамического

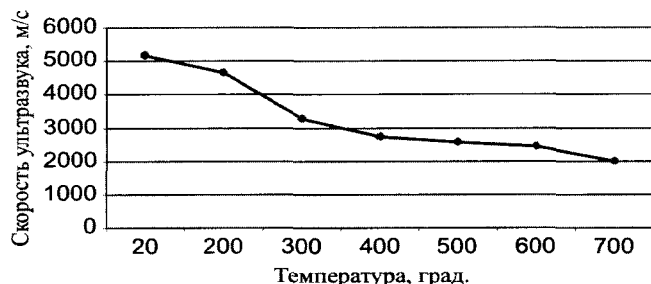


Рис. 8. Изменение скорости распространения ультразвука при повышении температуры

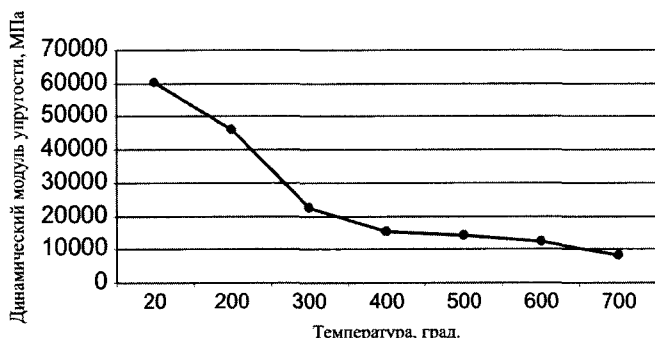


Рис. 9. Изменение динамического модуля упругости при повышении температуры

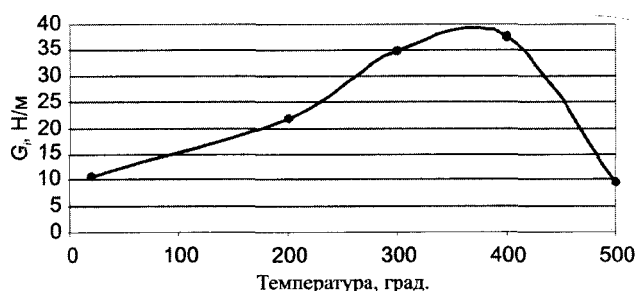
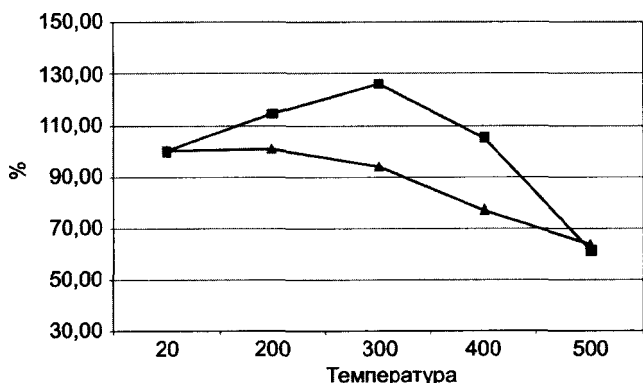


Рис. 10. Изменение удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение образцов при увеличении температуры нагрева



▲ Неразруш. контроль, МПа (Оникс 2.51)
■ fc, МПа

Рис. 11. Изменение значения кубиковой прочности и прочности, полученной при неразрушающем контроле

Таблица 2

T, °C	20	200	300	400	500
f _{c,cube} , МПа	87,5	100,35	110,6	92,1	53,55
Неразрушающий контроль, МПа ("Оникс 2.51")	68,62	69,28	64,52	52,88	43,65

модуля упругости. Скорость распространения волны вычислялась делением замеренной базы прозвучивания на зафиксированное время распространения (рис. 7, 8).

Кроме того, скорость распространения волны вычисляли по формуле

$$c_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}, \quad (3)$$

где c_l — скорость продольной упругой волны;
ν — коэффициент Пуассона;
E — динамический модуль упругости;
ρ — плотность бетонных образцов.

По полученным результатам вычисляли динамический модуль упругости, график изменения которого в зависимости от температуры представлен на рис. 9.

Учитывая упругий характер деформирования бетона на стадии предразрушения возможно определение удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение G_i через формулу определения квазистатического коэффициента интенсивности напряжений

$$K_I = \sqrt{G_i \cdot E_b}. \quad (4)$$

Функция влияния высокой температуры на G_i экстремальная, однако максимальное значение G_i зафиксировано при температуре 400 °C (рис. 10), тогда как прочности f_{c,cube} — при температуре 300 °C.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ УДАРНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

В соответствии с программой экспериментальных исследований каждый образец до и после нагрева испытывался методом неразрушающего контроля прочности с помощью прибора "Оникс 2.51". Значения изменения кубиковой прочности и прочности, полученной при неразрушающем контроле, в зависимости от температуры, приведены в таблице 2 и на рис. 11.

Достоинством данного измерения является меньшая по сравнению с ультразвуковым подверженностью результатов замеров прочности влиянию технологических факторов бетона: колебанию влагосодержания, состава заполнителя, возраста.

До нагрева экспериментальных образцов показания "Оникса" не превышали 70 МПа, что не совпадало со значениями, полученными при определении прочности разрушающим методом.

При сравнении результатов видны недостатки измерения прочности бетона ударным методом. К ним относятся невысокая "проникающая" способность, как следствие малой энергии удара и малой "вовлеченной" массы бетона, ограниченной на уровне поверхностного слоя бетона.

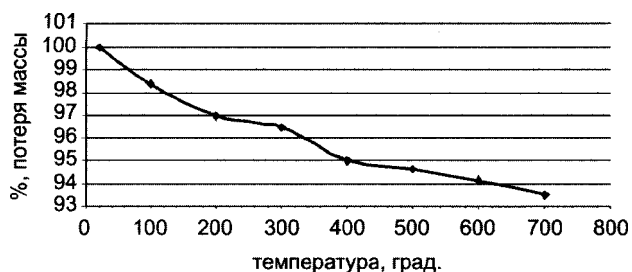


Рис. 12. Изменение потери массы бетонных образцов при нагреве

ПОТЕРЯ МАССЫ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Потеря массы образцов возрастала с ростом температуры (рис. 12). Процесс потери влаги протекал в три характерных этапа. Вначале потеря возрастала очень быстро с ростом температуры до 200 °С главным образом по причине испарения капиллярной воды в бетоне. Этот этап представляет собой физический процесс, поскольку происходит испарение капиллярной макроводы. При изменении температуры между 200 °С и 400 °С на потерю массы главным образом оказывало влияние испарение гелевой воды, и скорость испарения стала меньше, поскольку гелевой воде труднее выделяться из пор геля меньшего размера. Этот процесс является физико-химическим, так как происходит испарение гелевой мезоводы. На третьем этапе (температура выше

400 °С) изменение потери массы было вызвано главным образом уже разложением цементного камня и заполнителей — это уже химический процесс, так как происходит высвобождение микрохимически связанной воды.

ВЫВОДЫ

- 1 Проведенные исследования прочности высокопрочного бетона при высоких температурах показали, что ее изменения для высокопрочного и обычного бетонов сходны.
- 2 Параллельно с разрушающим контролем прочности был выполнен неразрушающий контроль, что позволило рассчитать по замеренной скорости ультразвука динамический модуль упругости высокопрочного бетона при высоких температурах.
- 3 Выполнены оригинальные исследования вязкости разрушения K_{IC} и K_{IIC} , что в сочетании с экспериментальной оценкой уменьшения влагосодержания бетона позволяет комплексно проанализировать растрескивание и разрушение бетона, разработать новые особо прочные и пластичные материалы и совершенствовать проектирование.
- 4 Впервые на основании собственных экспериментальных данных произведен расчет удельных затрат на квазистатическое разрушение G_f при высоких температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bazant, Z. P. & Kaplan, M. F. Concrete at high temperatures, Longman Group, Harlow, England, 1996.
2. ISO/TO 10158:1991/E/. Принципы и логические обоснования, лежащие в основе методов расчета огнестойкости строительных элементов / перевод с англ. Л. Ф. Мазаевой. — М.: НИКИ Энергетики, 1991. — 52 с.
3. Riley, M. A. Assessing fire-damaged concrete / M. A. Riley // *Concr. Int.: Desw. and Constr.* — 1991. — 13, № 6. — P. 60–63.
4. Жуков, В. В. Термостойкость железобетонных конструкций / В. В. Жуков, Э. Ф. Панюков. — Киев: Будівельник, 1991. — 218 с.
5. Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. — Монография. — Минск: БНТУ, 2006. — 220 с.

Статья поступила в редакцию 14.12.2009.