УДК 693.9:699.841

Н.И. КАРПЕНКО, д-р техн. наук, академик РААСН (niisf_lab9@mail.ru),
В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, почетный член РААСН (yarmakovsky@yandex.ru),
Д.З. КАДИЕВ, инженер

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный проезд, 21)

# Влияние влажности бетона на диаграммы его деформирования под нагрузкой при низкой отрицательной (до -70°С) температуре

Статья содержит анализ экспериментальных исследований по определению совместного влияния низкой отрицательной климатической (до -70°С) температуры и влажности бетона (в диапазоне от 3,12 до 5,2%) при В/Ц=0,4 на трансформацию диаграмм деформирования тяжелого бетона. Разработанные диаграммы предназначены для построения общих физических соотношений применительно к расчету железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях одновременного воздействия силовых нагрузок, значительной по величине отрицательной температуры и влажности бетона, современными вычислительными методами (МКЭ и др.).

**Ключевые слова:** диаграмма деформирования бетона, низкая отрицательная температура, влажность, железобетонные конструкции, нагрузка.

**Для цитирования:** Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. Влияние влажности бетона на диаграммы его деформирования под нагрузкой при низкой отрицательной (до -70°С) температуре // *Строительные материалы.* 2017. № 6. С. 10–13.

N.I. KARPENKO, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (niisf_lab9@yandex.ru)
V.N. YARMAKOVSKY, Candidate of Sciences (Engineering), Honorary Member of RAACS (yarmakov-sky@yandex.ru)
D.Z. KADIEV, Engineer, (yarmakovsky@yandex.ru)
Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS)
(21, Lokomotivny Passage, Moscow, 127238, Russian Federation)

## Influence of Humidity of Concrete on Its Deformation Diagrams under Load at Low Negative (up to -70°C) Temperatures

The article contains the analysis of experiment research in the definition of the joint effect of low negative climatic (up to -70°C) temperature and humidity of concrete (in the range of 3,12 to 5,20%) at the water-cement ratio=0.4 on the transformation of the diagrams of heavy (normal weight) concrete deformation. Developed diagrams are intended for building general physical ratios as applied to the calculation of reinforced concrete structures which operate under the conditions of simultaneous action of power loads, a significant negative temperature and humidity of concrete with the help of modern computational methods (finite element method for example).

**Keywords:** diagram of concrete deformation, low negative temperatures, humidity, reinforced concrete structures, load.

**For citation:** Karpenko N.I., Yarmakovsky V.N., Kadiev D.Z. Influence of humidity of concrete on its deformation diagrams under load at low negative (up to -70°C) temperatures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 10–13. (In Russian).

Актуальность выполнения исследований определяется необходимостью расчета диаграммным методом деформирования железобетонных конструкци й, эксплуатируемых в условиях одновременных силовых воздействий и воздействия низкой (до -70°С) климатической температуры.

Диаграммный метод расчета железобетонных конструкций является, как показано в работах авторов [1, 2], наиболее эффективным для использования при проектировании строительных конструкций инженерных сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях.

Авторами выполнены соответствующие исследования [1, 2] тяжелого бетона класса по прочности на сжатие В40 при В/Ц, равном 0,4 (наиболее эффективной величине В/Ц высокодолговечных бетонов типа High Performance Concrete – по классификации fib [3]). В результате получены аналитические зависимости, связывающие напряжения осевого сжатия с относительными продольными деформациями бетона. При этом учтены результаты соответствующих экспериментальных и теоретических исследований, выполненных профессорами Ю.В. Зайцевым и С.Н. Леоновичем [4].

И в тех, и в других исследованиях не учитывалось влияние на прочностные и деформативные характеристики бетона в замороженном до низкой отрицательной температуры состоянии такого важного фактора, как влажность бетона в естественном состоянии. Значение этого фактора в поведении бетона в условиях воздействия отрицательной температуры показано в работах В.М. Москвина и его учеников [5–6].

На рис. 1, *а* показаны полученные в исследованиях авторов статьи зависимости относительных величин призменной прочности тяжелого бетона с различной влажностью ($W_i$), определенных в испытаниях при $\sigma$=0,92 $R_{пр}$ и при температуре +20 и -65°С ($R_{пр}^{-65°C}/R_{пр}^{+20°C}$). Как видим, зависимость величины $R_{пр}^{-65°C}/R_{пр}^{+20°C}$ от $W_i$ (см. нижний ряд значений влажности по оси абсцисс) имеет линейный характер при увеличении последней до значения 5,11% ($W_i/W_0$=1,26, где $W_0$ – влажность бетона, условно принятая равной 4,05% как средневзвешенная в рассматриваемом интервале $W_i$ от 3,12 до 5,2%). Именно при такой величине влажности $W_i$=5,11% определяется пиковая точка рассматриваемой зависимости, имеющей при приближении к данной величине $W_i$ параболический характер.

Как следует из результатов исследований профессора В.М. Москвина и его учеников [5–6], эта величина влажности бетона (5,11% при $W_i/W_0$ = 1,26) близка к так называемой «критической» $W^{кр}$, когда практически все поры и капилляры бетона заполняются водой более чем на 90% их объема.

Известно [5, 6], что при замораживании бетона с влажностью $W^{кр}$ при температуре около -70°С развивающееся при этом гидравлическое давление на стенки пор и капилляров цементного камня в бетоне при фазовом пе-

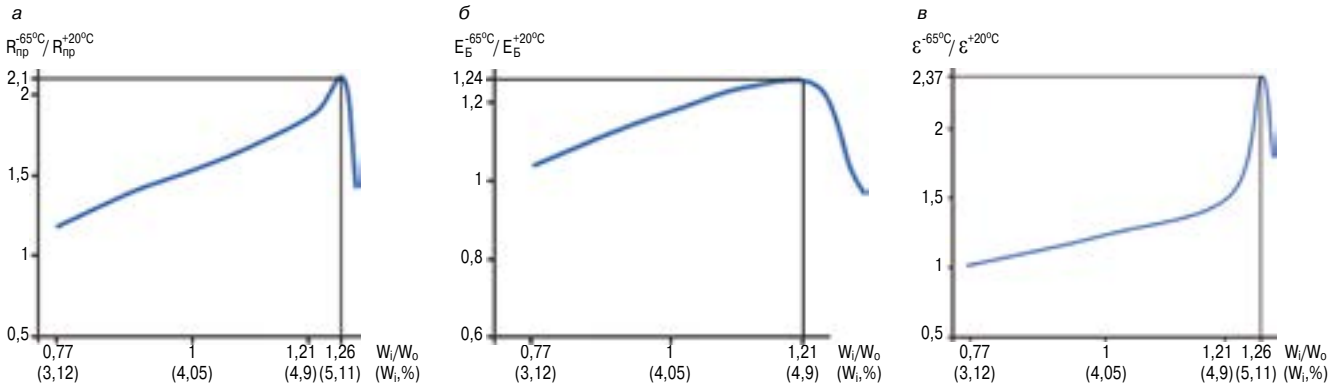


**Рис. 1.** Зависимость относительных величин призменной прочности (*а*); модулей упругости (*б*); деформаций сжатия при σ=0,92 $R_{пр}$ (*в*) тяжелого бетона при температуре -65 и +20°С от его влажности в абсолютном значении ($W_i$) и от его относительной влажности ($W_i/W_0$)

реходе воды в лед (когда происходит соответствующая трансформация структуры молекул воды) достигает величины, при которой структура бетона разрушается. Этому способствуют образующиеся в цементном камне необратимые микротрещины, которые затем соединяются с такими же необратимыми микротрещинами в контактной зоне цементного камня и крупного плотного заполнителя (называемыми в зарубежных источниках [7] bond cracks – «трещинами сцепления»). Развитие «трещин сцепления» в рассматриваемом случае обусловлено в основном существенной разницей в коэффициентах линейного температурного расширения компонентов бетона (цементного камня и крупного заполнителя): при замораживании водонасыщенного цементного камня развиваются напряжения преимущественно растяжения, а при замораживании плотного заполнителя, в частности гранита, в который не проникает вода, – напряжения сжатия. В конечном результате процесса деформирования тяжелого бетона под нагрузкой сжатия образуются непрерывные магистральные трещины (по Ю.В. Зайцеву [8]), разрушающие макроструктуру бетона.

На рис. 1, *б* приведена зависимость относительной величины модуля упругости бетона $E_Б^{-65^oC}/E_Б^{+20^oC}$ от его влажности $W_i$. Эта зависимость, как и зависимость $R_{пр}^{-65^oC}/R_{пр}^{+20^oC}$ от $W_i$, имеет экстремальный параболический характер. Точка перегиба параболы наблюдается уже при меньшей влажности бетона, а именно при $W_i$=4,9% ($W_i/W_0$=1,21). Последнее может свидетельствовать о том, что модуль упругости бетона – характеристика, более чувствительная (в сравнении с призменной прочностью) к структурным изменениям, происходящим в бетоне при столь низкой (до -65°С) отрицательной температуре.

На рис. 1, *в* представлена зависимость относительной величины предельных деформаций сжатия (ε) тяжелого бетона того же класса (В40) и такого же состава при том же В/Ц=0,4, определенная при температуре +20 и -65°С при уровнях напряжений сжатия $\sigma/R_{пр}$=0,92, т. е. зависимость величины $\varepsilon^{-65^oC}/\varepsilon^{+20^oC}$ от относительной влажности бетона $W_i/W_0$. Эта зависимость, так же как и зависимость относительного модуля упругости бетона от величины $W_i/W_0$, имеет явно параболический характер, но более выраженный. При этом пиковая точка перегиба параболы также соответствует влажности бетона $W_i$=5,11%.

Ниже рассматривается влияние величины влажности бетона на диаграммы его деформирования при низкой отрицательной температуре, построенные на основе результатов исследований [5, 6]. Эти диаграммы могут быть непосредственно использованы в разработанном авторами [1, 2] диаграммном методе расчета стержневых железобетонных конструкций, эксплуатируемых при низкой отрицательной температуре.

Аналитическая зависимость для криволинейных диаграмм деформирования бетона принимается в виде:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \beta_{t^\circ E} \nu_b}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_b$, $\sigma_b$, $E_b$ – соответственно относительная деформация, напряжение сжатия и начальный модуль упругости бетона при $t$=+20°С и влажности $W_0$=4,05%; $\beta_{t^\circ E}$ – коэффициент изменения модуля упругости бетона при воздействии низкой отрицательной температуры, определяемый в диапазоне от +20 до -70°С, с учетом коэффициента влажности по формуле:

$$\beta_{t^\circ E} = \gamma_E + 0{,}2\varphi_E \frac{20^\circ C - t^\circ C}{90^\circ C}, \qquad (2)$$

где $\gamma_E$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности на изменение модуля упругости бетона при температуре +20°С; $\varphi_E$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности на изменение модуля упругости бетона при низкой отрицательной температуре ( до -70°С);

$$\gamma_E = 1{,}2 - 0{,}52\left(\frac{W_i}{W_0}\right) + 0{,}32\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2; \qquad (3)$$

$$\varphi_E = -5{,}37 + 10{,}4\left(\frac{W_i}{W_0}\right) - 4{,}03\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2, \qquad (4)$$

где $W_0$ – средневзвешенная влажность бетона для рассматриваемого диапазона его влажности от 3,12 до 5,2% при В/Ц=0,4, равная 4,05%.

Значение коэффициента секущего модуля $\nu_b$ определяется по формуле:

$$\nu_b = \hat{\nu}_b \pm (\nu_0 - \hat{\nu}_b)\sqrt{1 - \omega_1\eta - (1 - \omega_1)\eta^2}, \qquad (5)$$

где $\hat{\nu}_b$ – значение коэффициента $\nu_b$ в вершине диаграммы зависимости величины относительных деформаций тяжелого бетона от напряжений сжатия при температуре от +20 до –70°С и влажности бетона в диапазоне от 3,12 до 5,2% (при $\sigma_b = \hat{\sigma}_{bt^0}$, где $\hat{\sigma}_{bt^0}$ – величина напряжения в вершине диаграммы вышеназванной зависимости при заданной температуре); плюс (+) принимается для восходящей ветви диаграммы, минус (-) – для нисходящей ветви; $\nu_0$ – значение коэффициента $\nu_b$ в начале диаграммы; $\omega_1$ – коэффициент, характеризующий полноту диаграммы:

– для восходящей ветви:

$$\nu_0 = 1; \quad \omega_1 = 2 - 2{,}5\,\hat{\nu}_b; \qquad (6)$$

– для нисходящей ветви:

$$\nu_0 = 2{,}05\,\hat{\nu}_b; \quad \omega_1 = 1{,}95\,\hat{\nu}_b - 0{,}138; \qquad (7)$$

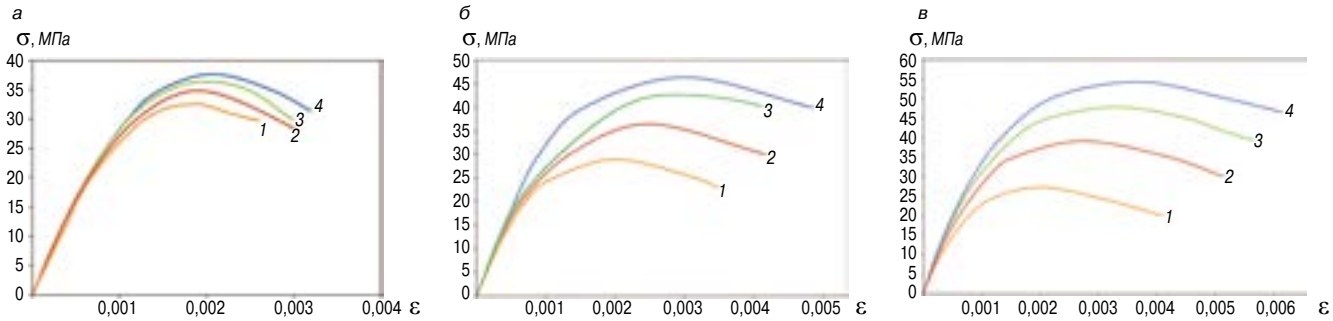


**Рис. 2.** Диаграммы зависимости величины относительных деформаций тяжелого бетона от напряжений сжатия при температуре от +20°С до –70°С и влажности бетона: *а* – 3,12%; *б* – 4,05%; *в* – 4,9%: *1* – +20°С; *2* – -20°С; *3* – -50°С; *4* – -70°С

η – уровень напряжений при заданной отрицательной температуре:

$$\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_{bt^0}, \quad (8)$$

где

$$\hat{\sigma}_{bt^0} = \hat{\sigma}_b \beta_{t^\circ R}, \quad (9)$$

где $\hat{\sigma}_b$ – напряжение в вершине диаграммы при $t$=+20°С (в расчетах $\hat{\sigma}_b = R_{b\,ser}$; $\beta_{t^\circ R}$ – коэффициент увеличения прочности в вершине диаграммы в зависимости от величины отрицательной температуры $t$):

$$\beta_{t^\circ R} = \gamma_R + 0{,}6\,\varphi_R \frac{20^\circ\mathrm{C} - t^\circ\mathrm{C}}{90^\circ\mathrm{C}}, \quad (10)$$

где $\gamma_R$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности бетона на его призменную прочность при температуре +20°С; $\varphi_R$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности бетона на его призменную прочность при низкой отрицательной температуре (до -70°С):

$$\gamma_R = 1{,}99 - 1{,}61\left(\frac{W_i}{W_0}\right) + 0{,}62\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2; \quad (11)$$

$$\varphi_R = -2{,}78 + 4{,}83\left(\frac{W_i}{W_0}\right) - 1{,}05\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2, \quad (12)$$

– для диаграммы сжатия:

$$\hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b \beta_{t^\circ R}}{\hat{\varepsilon}_b \cdot \beta_{t^\circ \varepsilon} E_b \beta_{t^\circ E}}, \quad (13)$$

где $\beta_{t^\circ E}$ – коэффициент изменения деформаций в вершине диаграммы сжатия, в диапазоне температуры от +20 до –70°С:

$$\hat{\varepsilon}_{bt^0} = \hat{\varepsilon}_b \beta_{t^\circ \varepsilon}; \quad (14)$$

$$\beta_{t^\circ \varepsilon} = \gamma_\varepsilon + 0{,}55\,\varphi_\varepsilon \frac{20^\circ\mathrm{C} - t^\circ\mathrm{C}}{90^\circ\mathrm{C}}, \quad (15)$$

где $\gamma_\varepsilon$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности на величину деформаций сжатия бетона при температуре +20°С; $\varphi_\varepsilon$ – коэффициент, учитывающий влияние влажности на величину деформаций сжатия бетона при низкой отрицательной температуре (до -70°С);

$$\gamma_\varepsilon = 0{,}69 + 0{,}56\left(\frac{W_i}{W_0}\right) - 0{,}25\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2, \quad (16)$$

$$\varphi_\varepsilon = -5{,}14 + 9{,}29\left(\frac{W_i}{W_0}\right) - 3{,}15\left(\frac{W_i}{W_0}\right)^2. \quad (17)$$

Деформации в вершине диаграммы при $t$=+20°С определяются следующим образом:

$$\hat{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b}\lambda \frac{1 + \left(0{,}8 - 0{,}15\frac{B^2}{10000}\right)\lambda B/60 + 0{,}2\lambda/B}{0{,}12 + 1{,}03B/60 + 0{,}2/B}, \quad (18)$$

где B – класс бетона по прочности при сжатии; λ – безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона и определяемый по рекомендациям в работах [1, 2]. Для тяжелого бетона λ=1.

Анализ данных диаграмм на рис. 2 показывает, что зависимость величины относительных деформаций сжатия бетонов от напряжений сжатия при всех рассматриваемых значениях влажности бетона $W_i$ и температуре от +20 до -70°С имеет параболический характер. При этом вершины этих парабол сдвигаются в сторону бóльших величин относительных деформаций при замораживании бетона и в сторону бóльших значений напряжений сжатия при всех величинах температуры испытаний бетонных образцов-призм.

**Заключение.** На основании анализа приведенных выше результатов экспериментальных исследований выполнена корректировка диаграмм деформирования тяжелого бетона при осевом сжатии в диапазоне температур от +20 до -70°С и изменения влажности бетона в диапазоне от 3,12% до 4,9%. Представленные в статье диаграммы могут быть использованы для расчета стержневых железобетонных элементов разработанным авторами диаграммным методом в условиях совместного действия нагрузок и значительных по величине отрицательной температуры при различной влажности бетона.

**Список литературы**

1. Карпенко С.Н., Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Диаграммный метод расчета стержневых железобетонных конструкций, эксплуатируемых при воздействии низких климатических (до -70°С) и технологических (до -150°С) температур // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2017. № 1. С. 104–108.
2. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций при отрица-

**References**

1. Karpenko S.N., Karpenko N.I, Yarmakovsky V.N. The chart (diagramm) method of calculation of rode's reinforced concrete structures operated under the influence of low climatic (up to -70°C) and technologic (up to -150°C) temperatures. *AKADEMIYA. Arhitektura i Stroitelstvo*. 2017. No. 1, pp. 79–83. (In Russian).
2. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovsky V.N. About the construction of the chart method of calculation of rode's reinforced concrete structures at low temperatures.

тельных температурах // *Сборник трудов Международной конференции «Полярная механика»*. Владивосток: СФУ, 2016. С. 181–191.
3. Lightweight Aggregate Concrete/ Codes and standards of fib (CEB-FIP). Stuttgart.1999. 35 p.
4. Зайцев Ю.В., С.Н. Леонович. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. 362 с.
5. Ярмаковский В.Н. Прочностные и деформативные характеристики бетона при низких отрицательных температурах // *Бетон и железобетон*. 1971. № 10. С. 9–15.
6. Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат (Ленинградское отделение). 1973. 172 с.
7. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-strain Curve. JACI, 1963. v. 60. No. 2, pp. 8–16.
8. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 310 с.

*Proceedings of the International conference "Polar mechanics"*. Vladivostok. 2016, pp. 181–191. (In Russian).
3. Lightweight Aggregate Concrete/ Codes and standards of fib (CEB-FIP). Stuttgart. 1999. 35 p.
4. Zaitsev Yu.V., Leonovich S.N. [Prochnost' i dolgovechnost' konstruktsionnyh materialov s treshchinoy ] The strength and durability of structural materials with crack. Minsk: BNTU, 2010. 362 p.
5. Yarmakovsky V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at low temperatures. *Beton i zhelezobeton*. 1971. No. 10, pp. 9–15. (In Russian).
6. Moskvin V.M., Capkin M.M., Savitsky, A.N., Yarmakovsky V.N. [Beton dlya stroitel'stva v surovyh klimaticheskih usloviyah] Concrete for construction in severe climatic conditions. Leningrad: Stroyizdat, 1973. 172 p.
7. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of Stress-strain Curve. JACI, 1963. v. 60. No. 2, pp. 8–16.
9. Zaitsev Yu. V. [Modelirovanie deformatsiy i prochnosti betona metodami razrusheniya] Modeling of deformation and strength of concrete methods of destruction. Moscow: Stroyizdat, 1982. 310 p.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

## В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу

**Монография «Защита деревянных конструкций»**

Автор – Ломакин А.Д.

Приведены результаты исследований и рекомендации по конструкционной и химической защите деревянных конструкций. Особое внимание уделено защите несущих клееных деревянных конструкций и конструкций из ЛВЛ от эксплуатационных воздействий и возгорания. Описаны традиционные и разработанные автором методы оценки защитных свойств покрытий для древесины, методика и результаты натурных климатических испытаний покрытий на образцах и фрагментах конструкций. Представлены результаты мониторинга влажностного состояния несущих ДКК в таких крупных объектах, как ЦВЗ «Манеж», крытый конькобежный центр в Крылатском в Москве и др., при проведении которого использована разработанная автором методика оценки древесины с использованием модельных образцов.

**Учебное пособие «Практикум по технологии керамики»**

Авторы – коллектив ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Рассмотрены основные методы отбора проб, испытаний сырьевых материалов, контроля и исследования технологических процессов, а также определения свойств готовой продукции, применяемые в керамической, огнеупорной и смежных отраслях промышленности. Пособие может быть использовано не только как учебное, но и в качестве полезного руководства для инженеров заводских и научно-исследовательских лабораторий.

**Книга «Керамические пигменты»**

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.

**Заказать литературу можно через редакцию,
направив заявку произвольной формы
по факсу: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: mail@rifsm.ru,
или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru**