

УДК 699.8

DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72

В.Ф. СТЕПАНОВА¹, д-р техн. наук (vfstepanova@mail.ru),
 Н.К. РОЗЕНТАЛЬ¹, д-р техн. наук (rosental08@mail.ru),
 Г.В. ЧЕХНИЙ¹, канд. техн. наук (chekniy@mail.ru);
 С.М. БАЕВ², генеральный директор (baevsm@mail.ru)

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ), АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

² ЗАО «Служба защиты сооружений» (129329, г. Москва, ул. Кольская, 7, корп. 3, оф. 9)

Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций

Анализ научно-технической и нормативной литературы по применению торкрет-бетона показал, что, ориентируясь на высокую прочность и водонепроницаемость, авторы утверждают, что торкрет-бетон обладает высокой коррозионной стойкостью. Приведенные результаты испытаний не всегда подтверждают это положение. Недостаточная изученность коррозионных свойств торкрет-бетона ограничивает области его применения не только для бетонирования новых конструкций, но и для ремонтных работ. Для назначения торкрет-бетона в качестве защиты железобетонных конструкций от агрессивных воздействий среды необходимы данные о его сульфатостойкости и диффузионной проницаемости для хлоридов как наиболее агрессивных сред. На основании выполненных исследований торкрет-бетона в сульфатных и хлоридных средах определены нормируемые параметры торкрет-бетона повышенной коррозионной стойкости. Полученные данные позволяют рассматривать торкрет-бетон в качестве эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии в сульфатных и хлоридных средах.

Ключевые слова: коррозия, агрессивная среда, водонепроницаемость, сульфатостойкость, диффузионная проницаемость для хлоридов, защита от коррозии.

Для цитирования: Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Баев С.М. Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 69–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72

V.F. STEPANOVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (vfstepanova@mail.ru),
 N.K. ROZENTAL¹, Doctor of Sciences (Engineering) (rosental08@mail.ru),
 G.V. CHEKHNIY¹, Candidate of Sciences (Engineering) (chekniy@mail.ru);
 S.M. BAEV², General Director (baevsm@mail.ru)

¹ Research, Design and Technological Institute for Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,

"Research and Development Center "Stroitel'stvo" AO (6, 2-nd Institutskaia Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

² Structural Protection Service, ZAO (7, building 3, office 9, Kolskaia Street, Moscow, 129329, Russian Federation)

Determination of Corrosion Resistance of Shotcrete as a Protective Coating of Concrete and Reinforced Concrete Structures

The analysis of scientific, technical and normative literature on the use of shotcrete shows that focusing on high strength and water tightness, the authors state that the shotcrete has high corrosion resistance. The presented test results do not always confirm this position. Insufficient study of the corrosion properties of shotcrete limits the scope of its application not only for concreting new structures, but also for repair work. For the use of shotcrete as a protection of reinforced concrete structures against aggressive impacts of the environment, data on its sulfate resistance and diffusion permeability for chlorides as the most aggressive media are required. On the basis of the performed studies of shotcrete in sulfate and chloride media, the normalized parameters of shotcrete of increased corrosion resistance were determined. The data obtained make it possible to consider shotcrete as an effective protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion in sulfate and chloride media.

Keywords: corrosion, aggressive medium, watertightness, sulfate resistance, diffusion permeability for chlorides, protection against corrosion.

For citation: Stepanova V.F., Rozental N.K., Chekhny G.V., Baev S.M. Determination of corrosion resistance of shotcrete as a protective coating of concrete and reinforced concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 69–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72 (In Russian).

В лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена научно-исследовательская работа по изучению стойкости торкрет-бетона в агрессивных сульфатных и хлоридных средах и определению нормируемых параметров торкрет-бетона повышенной коррозионной стойкости.

Особенностью торкрет-бетона является его высокая плотность. Трещины, образующиеся в нанесенном слое вследствие усадки бетона при испарении воды, перекрываются последующими слоями торкрет-бетона. В результате образуется плотная нетрещиноватая структура, что способствует созданию малопроницаемого бетона повышенной коррозионной стойкости.

Торкрет-бетон успешно применяется в ремонтных работах по защите подземных сооружений — туннелей, шахт; восстановлению и усилению поврежденных конструкций, в том числе защитного слоя бетона; защите стальных конструкций; выполнению облицовки с целью защиты конструкций от воздействия огня; устранению дефектов строительства; ремонту мостов и гидротехнических сооружений и др. [1–4].

В зарубежной и отечественной литературе в основном описана технология торкрет-бетона с указанием областей его применения, требования к материалам для изготовления торкрет-бетона, указаны основные свойства — прочность, водонепроницаемость (Куликов А.В., Иванов В.П., Баев С.М. Исследования свойств и области применения торкрет-бетона

http://www.volokno.su/netcat_files/128/110/Issledovanie_svoystv_i_oblasti_primeneniya_torkret_betonov.pdf (дата обращения 22.02.2018); Методические рекомендации по применению торкрет-бетона (ТУ 5745-001-16216892) при строительстве и ремонте гидротехнических сооружений СТО 16216892-002–2010; European Specification for Sprayed Concrete [5]). Сведения о коррозионных характеристиках торкрет-бетона практически отсутствуют.

На основании аналитического обзора научно-технической, нормативной и методической литературы по применению торкрет-бетонов разработана программа исследований, в основу которой был положен подбор составов и изготовление торкрет-бетона с заданными физико-механическими свойствами. По результатам определения прочности и водонепроницаемости были выбраны оптимальные составы и изготовлены образцы торкрет-бетона для изучения коррозионных свойств.

Для назначения торкрет-бетона в качестве защиты железобетонных конструкций от агрессивных воздействий среды необходимы данные о его сульфатостойкости и проницаемости для хлоридов как наиболее агрессивных сред. Недостаточная изученность коррозионных свойств торкрет-бетона ограничивает области его применения не только для бетонирования новых конструкций, но и для ремонтных работ.

Анализ результатов по определению прочности и водонепроницаемости показал, что, используя торкретирование как вид бетонирования при ведении ремонтно-восстановительных работ, можно получить широкий диапазон прочностных характеристик торкрет-бетона. Прочность при сжатии в отдельных составах получена от 37,3 до 68,9 МПа, на растяжение при раскалывании — от 3,3 до 6,7 МПа, марки по водонепроницаемости — на уровне W12–W14, что позволило оценить материал как бетон особо низкой проницаемости и является предпосылкой для повышенной и высокой коррозионной стойкости торкрет-бетона.

Для исследований коррозионных свойств были изготовлены образцы торкрет-бетона сухим и мокрым способом с расходом цемента 400–500 кг/м³. Сухим способом образцы изготавливались из мелкозернистого бетона (на песке с $M_{кр}=2,5$). Мокрым способом образцы изготавливались с применением щебня фракции 5–10 мм. При этом использовались химические и минеральные добавки.

Торкретирование выполнялось послойно. Слои наносились горизонтальными полосами шириной около 1 м, сразу по всей ширине покрываемой поверхности опалубки с перекрытием соседних полос не менее чем на 20 см. При использовании составов без добавок второй слой наносили через 2 ч после первого. При нанесении составов с пластифицированными добавками (с уменьшением расхода воды) периоды времени между нанесением отдельных слоев сокращались до 20 мин.

В течение 7 сут после изготовления полученные торкрет-бетонные плиты периодически увлажняли. Затем выбуривали керны требуемого диаметра и длины. Керны разрезали на образцы разной длины в зависимости от вида испытания.

В соответствии с СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» сульфатостойкости бетона определяется двумя основными параметрами:

- видом используемого цемента (рядовой, нормированного состава, сульфатостойкий);
- проницаемостью бетона.

Первый параметр связан с большей или меньшей способностью цементного камня химически взаимодействовать с сульфатами агрессивной среды (реак-

ционная способность), образуя продукты реакции — гипс и гидросульфатоалюминаты кальция в моно- и трехсульфатной форме. Кристаллизация указанных соединений происходит с увеличением объема твердых фаз, что вызывает сначала уплотнение бетона (заполнение пор и капилляров), затем возникновение внутренних напряжений и разрушение бетона. Чем ниже содержание минералов C_3S и C_3A в клинкере портландцемента, тем меньшее количество гипса и гидросульфатоалюминатов может образоваться в цементном камне при взаимодействии с сульфатной средой и тем меньше опасность коррозионного повреждения бетона [6, 7].

Второй параметр — проницаемость бетона — предопределяет скорость проникновения сульфат-ионов агрессивной среды внутрь бетона.

Применение в технологии бетонов эффективных химических и минеральных добавок позволяет при неизменной подвижности бетонной смеси уменьшить проницаемость бетона и таким образом повысить стойкость бетона в агрессивных сульфатных средах [8, 9].

Сульфатостойкость торкрет-бетона определяли по аналогии с плотным тяжелым бетоном с учетом требований ГОСТ 27677–88 «Бетоны. Общие требования к проведению испытаний» и «Рекомендаций по методам определения коррозионной стойкости бетона».

Для ускорения процессов сульфатной коррозии испытания выполняли в растворе сульфата натрия повышенной концентрации — с содержанием иона SO_4^{2-} в количестве 34000 мг/л при полном постоянном погружении образцов в агрессивный раствор и дистиллированную воду. Контролировали кинетику поглощения образцами сульфат-ионов и изменение прочности торкрет-бетона. Исследование кинетики поглощения сульфатов выполняли на образцах-цилиндрах диаметром 50 мм, высотой 50 мм, изменение прочности — на образцах-цилиндрах диаметром 100 мм, высотой 100 мм.

По разности концентраций иона SO_4^{2-} в агрессивном растворе до и в процессе испытаний определяли количество поглощенных сульфатов в пересчете на SO_3 в % от массы цемента. Испытания показали, что за прошедший период поглощение сульфатов торкрет-бетоном, изготовленным и сухим и мокрым способами, составило 2,57–3,74% массы цемента (табл. 1), что свидетельствует о незначительной скорости коррозионного процесса. Прочность бетона несколько повысилась, что характерно для процессов сульфатной коррозии [10].

Сравнение полученных данных с результатами ранее выполненных длительных исследований сульфатостойкости тяжелых бетонов марок по водонепроницаемости W8–W10, изготовленных на различных портландцементных, показало, что кинетика поглощения сульфатов образцами торкрет-бетона близка к скорости поглощения сульфатов тяжелыми бетонами повышенной сульфатостойкости.

Таким образом, показано, что сульфатостойкость торкрет-бетона марок по водонепроницаемости W12 и выше, изготовленных на портландцементных группы II по ГОСТ 10178, ГОСТ 31108 (содержание в клинкере C_3S не более 65%, C_3A — не более 7%, C_3A+C_4AF — не более 22%), соответствует стойкости бетонов в сульфатных средах, изготовленных на сульфатостойких портландцементных по ГОСТ 22266. С учетом значения проницаемости бетона, вида вяжущего и добавок сульфатостойкость торкрет-бетона следует оценивать по аналогии с тяжелым бетоном согласно СП 28.13330.2017.

Метод определения диффузионной проницаемости торкрет-бетона для хлоридов основан на аналогии меж-

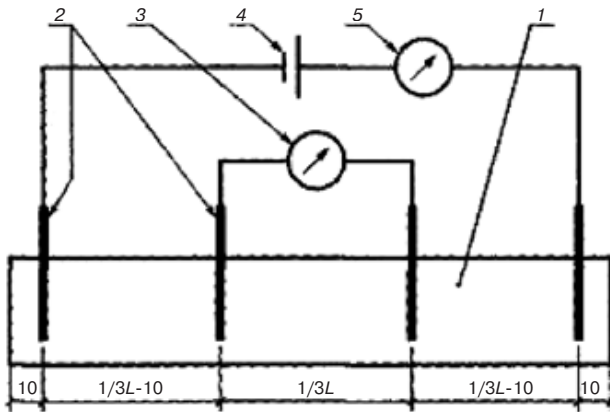


Рис. 1. Схема измерения электрического сопротивления образцов из бетона: 1 – образец из бетона; 2 – электроды; 3 – вольтметр; 4 – источник тока; 5 – микроамперметр; L – длина образца

Таблица 1

Составы, кг/м ³	Количество поглощенных ионов SO ₄ ²⁻	
	мг/см ²	% от массы цемента в реакционном слое
Цемент 500 Песок 1908	6,96	3,74
Цемент 400 Песок 609 Щебень 1000 Эмбэлит 40 Центрамент Эйр 202-1	4,8	2,57

ду диффузионным потоком вещества и электрическим током в теле бетона. Метод применяется для определения диффузионной проницаемости бетонов [11], не содержащих металлических включений – стальной арматуры, стальной фибры. С учетом этого испытывали образцы торкрет-бетона, изготовленные без применения стальной фибры, по ГОСТ 31383 по методу четырех электродов.

Для исследования использовали образцы, выбуренные из многослойного массива торкрет-бетона, нанесенного на бетонную подложку. Диаметр образцов 70 мм, высота 300 мм. В высверленные скважины диаметром 5 мм согласно схеме, приведенной на рис. 1, установили стальные электроды на цементно-песчаном растворе.

Образцы с электродами в течение 3 сут насыщали дистиллированной водой. Затем по схеме, приведенной на рис. 1, подключали источник тока и последовательно включенный в цепь микроамперметр. Регулируя значение тока, устанавливали разность потенциалов ΔV между средними электродами в пределах от 10 до 15 В и измеряли значение тока в цепи.

По полученным результатам рассчитывали удельное электрическое сопротивление бетона ρ_б, Ом·см, по формуле:

$$\rho_b = F \Delta V / I \cdot a, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения бетонного образца, см²; ΔV – разность потенциалов в вольтах между средними электродами после включения тока, В; I – ток в электрической цепи установки в амперах, А; a – расстояние между средними электродами в образце, см.

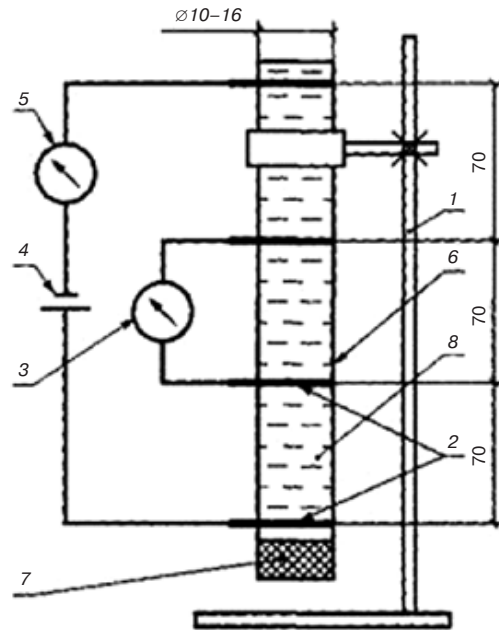


Рис. 2. Установка для измерения электрического сопротивления водной вытяжки из торкрет-бетона: 1 – штатив; 2 – электроды; 3 – вольтметр; 4 – источник тока; 5 – микроамперметр; 6 – трубка из неэлектропроводного материала; 7 – пробка; 8 – водная вытяжка

Таблица 2

Торкрет-бетон с добавкой, кг/м ³	Коэффициент диффузии для хлоридов, м ² /с, в возрасте	
	28 сут	120 сут
Микрокремнезем – 34	4,76 · 10 ⁻¹²	3,77 · 10 ⁻¹²
Микрокремнезем – 50	4,58 · 10 ⁻¹²	3,80 · 10 ⁻¹²
Микрокремнезем – 35 + пропиленовая фибра	10,35 · 10 ⁻¹²	7,38 · 10 ⁻¹²
Микрокремнезем – 50 + пропиленовая фибра	8,66 · 10 ⁻¹²	5,50 · 10 ⁻¹²

Площадь поперечного сечения образца F, см², равна:

$$F = \pi \cdot D^2 / 4, \quad (2)$$

где D – диаметр бетонного образца, см.

Измерение электрического сопротивления вытяжки из бетона при разных соотношениях твердого материала и воды выполняли с помощью прибора, показанного на рис. 2.

Для получения водной вытяжки образец торкрет-бетона, не имеющий электродов, высушивали до постоянной массы и дробили до полного прохождения через сито с размером ячеек 0,63 мм. Из дробленого материала образца отбирали четыре пробы массой (100±1), (40±0,5), (20±0,2), (10±0,1) г и засыпали в четыре стеклянные колбы. В колбы заливали дистиллированную воду в количестве 100 см³. Колбы герметично закрывали и оставляли на 72 ч, периодически взбалтывая.

Отстоявшуюся над осадком водную вытяжку, не взбалтывая, сливали через воронку с фильтром в трубку прибора. Включали ток, устанавливали между средними электродами разность потенциалов водной вытяжки ΔV_{ВВ}, равную (5±0,5) В, и измеряли значение тока в цепи.

Удельное электрическое сопротивление водной вытяжки ρ_{ВВ} рассчитывали по формуле:

$$\rho_{BB} = K \frac{\Delta V_{BB}}{I_{BB}}, \quad (3)$$

где K – постоянная прибора, учитывающая расстояние между электродами и площадь поперечного сечения трубки, равная 0,2378.

По полученным результатам рассчитывали эффективную сквозную пористость бетона $\Pi_{эф}$ по формуле:

$$\Pi_{эф} = \rho_{BB} / \rho_6, \quad (4)$$

где ρ_{BB} – удельное электрическое сопротивление водной вытяжки, Ом·см; ρ_6 – удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·см.

Коэффициент диффузии хлоридов в бетоне D_6 рассчитывали по формуле:

$$D_6 = D_{Cl} \times \Pi_{эф}, \quad (5)$$

где D_{Cl} – коэффициент диффузии хлоридов в воде принимали по справочнику равным $1,23 \cdot 10^{-5}$ см²/с.

Список литературы

1. Кузьмина Е.С. Прогрессивная технология торкрет-бетонирования. *Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Новосибирск, 2017. С. 106–110.
2. Денисова А.П., Костина О.Д. Возрождение торкрет-бетона в строительстве // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2011. № 1. С. 96–99.
3. Швырков С.А., Петров А.П., Назаров В.П., Юрьев Я.И. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара // *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т. 25. № 12. С. 5–12.
4. Ивашенко Ю.В., Тронча Л.А., Рябухин А.К. Разработка эффективного решения защитного сооружения в сложных условиях строительства // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции молодых ученых*. Краснодар, 2016. С. 793–794.
5. Melbye N., Dimmock R., Garshol K.F. Sprayed concrete for rock support. MBT International Underground Construction Group, Division of MBT Ltd. Switzerland. 2001. 247 p.
6. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты. М.: Стройиздат. 1980. 536 с.
7. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта. 2004. 295 с.
8. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: ФГУП ЦПП. 2006. 520 с.
9. Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2014. № 3. С. 16–21.
10. Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Любарская Г.В. Бетоны с водоредуцирующими и уплотняющими добавками в сульфатных и хлоридных средах // *Цемент и его применение*. 2011. № 1. С. 106–110.
11. Патент РФ 2269777. *Способ определения диффузионной проницаемости бетона* / Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Федоров Д.Ю. Заявл. 31.05.2004. Опубл. 10.02.2006. Бюл. № 4.

Результаты определения диффузионной проницаемости для хлоридов водонасыщенных образцов сухого торкрет-бетона в водонасыщенном состоянии приведены в табл. 2.

Диффузионная проницаемость торкрет-бетона для хлоридов со временем по мере гидратации цемента и уплотнения бетона снижается. Полипропиленовая фибра, введенная в состав торкрет-бетона для уменьшения растрескивания от усадки, увеличила диффузионную проницаемость. Объясняется это тем, что полипропиленовая фибра увеличивает воздухововлечение.

Полученные результаты ускоренных коррозионных испытаний позволяют рассматривать торкрет-бетон в качестве эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Испытания на сульфатостойкость и диффузионную проницаемость торкрет-бетона для хлоридов продолжаются. Окончательные выводы об условиях и области применения, а также нормируемые параметры торкрет-бетона повышенной коррозионной стойкости будут уточнены после получения результатов длительных коррозионных испытаний.

References

1. Kuzmina E.S. Progressive technology of shotcrete-concreting. *Fundamental and Applied Research of Young Scientists Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Novosibirsk. 2017, pp. 106–110. (In Russian).
2. Denisova A.P., Kostina O.D. Revival of shotcrete in construction. *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2011. No. 1, pp. 96–99. (In Russian)
3. Shvyrkov S.A., Petrov A.P., Nazarov V.P., Yur'ev Ya.I. Thermotechnical properties of concrete, shotcrete-concrete and shotcrete-fiber-reinforced concrete in conditions of hydrocarbon fire. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2016. Vol. 25. No. 12, pp. 5–12. (In Russian).
4. Ivashchenko Yu.V., Troncha L.A., Ryabukhin A.K. Development of an effective solution of a protective structure in difficult construction conditions. *Scientific provision of the agro-industrial complex Collection of articles on the materials of the IX All-Russian Conference of Young Scientists*. Krasnodar. 2016, pp. 793–794. (In Russian).
5. Melbye N., Dimmock R., Garshol K.F. Sprayed concrete for rock support. MBT International Underground Construction Group, Division of MBT Ltd. Switzerland. 2001. 247 p.
6. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korrozija betona i zhelezobetona. Metody ih zashchity. [Corrosion of concrete and reinforced concrete. Methods of their protection]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 536 p.
7. Stark I., Wicht B. Dolgovechnost' betona [Durability of concrete]. Kiev: Oranta. 2004. 295 p.
8. Rosental N.K. Korroziionnaja stojkost' cementnyh betonov nizkoj i osobo nizkoj pronicaemosti [Corrosion resistance of cement concrete of low and particularly low permeability]. Moscow: FSUE CPP. 2006. 520 p.
9. Sheynfeld A.V. Organomineralic modifiers as a factor increasing the durability of reinforced concrete structures. *Beton i zhelezobeton*. 2014. No. 3, pp. 16–21. (In Russian).
10. Rosental N.K., Chehny G.V., Lyubarskaya G.V. Concretes with water-reducing and sealing additives in sulfate and chloride media. *Cement i ego primenenie*. 2011. No. 1, pp. 106–110. (In Russian).
11. Patent RF 2269777. *Sposob opredelenija diffuzionnoj pronicaemosti betona* [Method for determining the diffusion permeability of concrete]. Rosental N.K., Chehny G.V., Fedorov D.Yu.; Declared 31.05.2004. Published 10.02.2006. Bulletin No. 4. (In Russian).