

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 627.33/34.004.67

А.П. ПИЧУГИН, А.А. ШАТАЛОВ

РАСЧЕТ СРОКОВ РЕМОНТА БЕТОННЫХ ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ

Установленные в ходе обследования разрушения бетонных причальных массивов, выявление увеличенной суммарной пористости, показывающей высокую степень коррозионного процесса в материале, свидетельствуют о необходимости объективного расчета сроков ремонта и восстановления этих объектов. В статье представлены аналитические и практические варианты оценки сроков ремонта и восстановления бетона с учетом всех факторов и разнообразия. Определен порядок расчета и приведены расчетные формулы для назначения степени разрушения, что позволяет выработать рекомендации по восстановлению работоспособности бетонных объектов. Предложены полимерсиликатные композиции с добавками направленного действия, обеспечивающие сохранность и эксплуатационную пригодность причальных сооружений с различной степенью разрушения.

Ключевые слова: разрушение бетона, коррозия бетона, предельно допустимая глубина повреждений, несущая способность причальных сооружений, пористость, водонепроницаемость, морозостойкость, долговечность причальных сооружений.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-725-5-121-130

Зимний период в северных краях продолжается от 5–6 месяцев в низких широтах до 7–8 – на дальнем севере. Годовое распределение максимумов и минимумов температур воздуха следующее: средняя месячная температура самого холодного месяца в северной части –30...–34 °С, в южных районах –18...–23 °С. Своеобразны ледовые условия речных бассейнов: наряду с незамерзающими районами имеются районы с плавающими ледяными полями, особенно вблизи городов и портов в низовьях Оби и Енисея. Постоянные волнения увеличивают смачиваемую зону в сооружениях порядка 2–6 м в высоту. Приняты следующие усредненные расчетные условия работы бетона в сооружениях в наиболее опасных зонах переменных уровней воды: количество естественных циклов заморзания и оттаивания в сооружениях – 180–235

© Пичугин А.П., Шаталов А.А., 2019

в год; количество естественных циклов намокания и высушивания – 200–350 в год. Учитывая частоту смен замерзания и оттаивания, число перемен уровня воды на омываемой поверхности, воздействия воды, динамических силовых нагрузок под влиянием ударов льда, волн, песка и гальки, можно признать условия работы бетона в портовых сооружениях как особо суровые [1, 2].

Анализ результатов обследований позволили установить основные причины коррозионных разрушений гидротехнических сооружений, приведших к потере эксплуатационной пригодности данных объектов. Предварительно по каждому причалу была изучена техническая документация с акцентированием тех или иных особенностей конструктивного исполнения и используемых материалов. В большинстве случаев использовался монолитный бетон и причальные плиты или блоки заводского изготовления. Высота бетонных причальных стенок составляла от 3 до 12 м. В некоторых случаях в качестве оснований были использованы бетонные и железобетонные короба длиной по фронту до 6–8 м, шириной до 5–10 м. Толщина устраиваемых стенок варьировала от 0,3 до 0,5 м. После бетонирования короба заполнялись рваным бутом, песком, песчано-гравийной смесью. Верхнее покрытие, как правило, выполнено из обычного тощего бетона [1–3].

При обследовании производился визуальный осмотр открытых поверхностей, замеры деформаций и разрушений в различных частях сооружений с нанесением поврежденных участков на план-схемы, отбор проб образцов бетонов с поверхности и из глубины сооружений с последующим проведением физико-механических испытаний и химических анализов. С учетом выявленных дефектов было проведено разделение по степени разрушения на четыре группы: поверхностные разрушения незначительного объема бетона, не нарушающие работы причальных стенок. Такие нарушения могут быть в результате ледового воздействия, ударов судов, низким качеством уплотнения монолитного бетона. Более весомые разрушения защитного слоя бетона с обнажением и коррозией арматуры могут свидетельствовать о коррозии бетона, обусловленной выщелачиванием и вымыванием оксида кальция из цементного камня, а также возможным химическом взаимодействии активных водных сред с минералами цементного бетона [2, 4, 5] (рис. 1).

Разрушение массивов бетона свидетельствует о полной деградации материала и потери его несущей способности, т.е. о невозможности дальнейшей эксплуатации причала без проведения ремонтно-восстановительных работ. Полное разрушение бетонного массива основания причала связано с низкой морозостойкостью монолитного бетона и потребностью срочного разбора конструкции причала с заменой вышедших из строя элементов [2, 6–8].

Основными причинами, способствовавшими интенсивному разрушению бетона причальных сооружений, явились: неплотная структура бетона, облегчающая доступ фильтрующим водам; применение в бетонах местных заполнителей без учета их качества; использование цемента с неудовлетворительным химико-минералогическим составом или потерявшим часть ак-

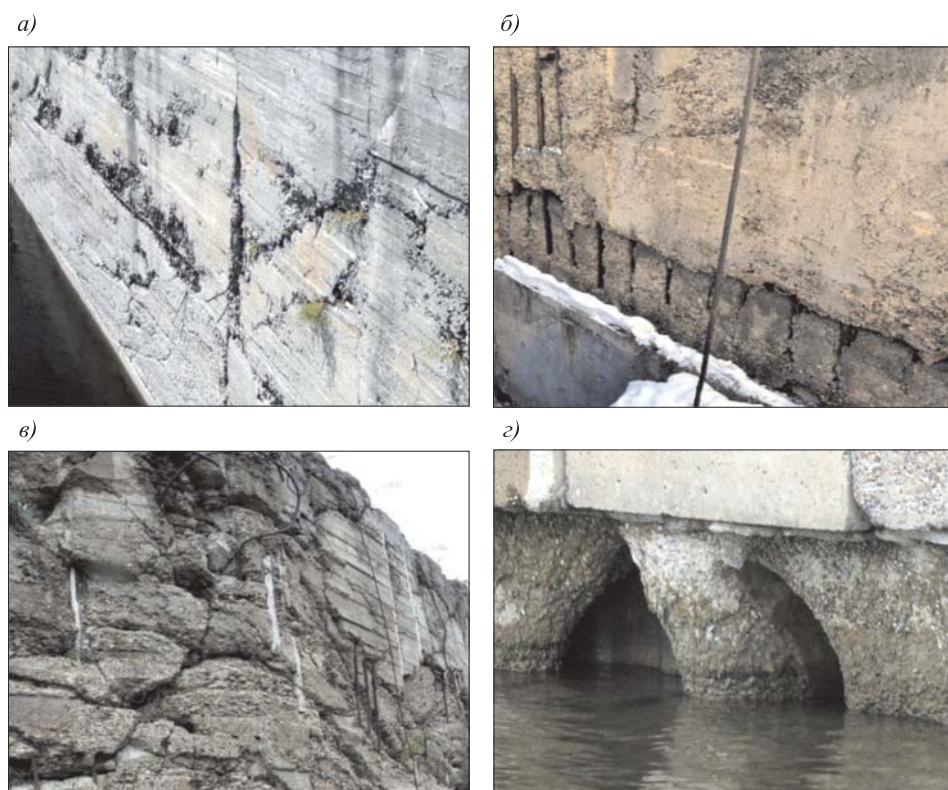


Рис. 1. Состояние бетонных причалов речных портовых сооружений с различной степенью разрушения

а – поверхностные разрушения, вызванные низким качеством уплотнения монолитного бетона; *б* – разрушение защитного слоя монолитного железобетона лицевой части пирса, оголение и коррозия арматуры в зоне переменного уровня воды, обнажение и коррозия арматуры; *в* – деформация и массовое разрушение бетонного массива без обрушения; *з* – полное разрушение бетонного массива основания причала

тивности, оказавшимся нестойким в условиях морозного воздействия и агрессивности вод; отсутствие проводимых защитных мероприятий по сохранению причальных плит, особенно в зоне переменного уровня воды и капиллярного подсоса. Все это способствовало усилению коррозии в бетоне в результате постоянного замачивания и пониженных температур. Средняя глубина каверн в бетоне в зоне переменных уровней по фронту сооружения при обследовании составила 1,0–1,5 м, что вызвало обрушение бетонных плит в некоторых местах причалов [1, 2].

Работоспособность портовых сооружений и их пропускная способность при проведении текущего и капитального ремонта отдельных элементов причалов значительно целесообразнее по экономическим и техническим затратам по сравнению со строительством новых объектов. Работы по усилению требуют меньших капитальных затрат и могут быть выполнены в существенно более короткие сроки. При этом возрастает не только несущая способность отдельных конструктивных элементов и конструкций, но и повышается эксплуатационная надежность всего портового сооружения [3].

Ремонт, защита и усиление эксплуатируемых бетонных портовых сооружений должны подтверждаться и обосновываться в каждом конкретном

случае прочностными и технико-экономическими расчетами. Этому должно предшествовать выполнение расчета несущей способности сооружения с установлением степени потери в результате эксплуатации по сравнению с начальными параметрами, что может быть установлено только на основании комплексных натуральных инструментальных исследований. При разработке проекта ремонта и реконструкции бетонных причальных сооружений следует исходить из положения, что предельно допустимым является такое повреждение, при наличии которого несущая способность элемента соответствует проектной, что гарантирует надежность сооружения в целом. В качестве методического обеспечения была принята методология расчетов, изложенная в работах [9–11].

Для каждой отдельной конструкции или ее элементов рассчитывается отношение

$$n = (S - S_n)/S = \Delta S/S, \quad (1)$$

где S – несущая способность конструкции или ее элемента, устанавливаемая на основе натурной проверки;

S_n – несущая способность конструкции или ее элемента, закладываемая на стадии проектирования.

Основной задачей является определение предельно допустимой глубины повреждения элементов конструкции из однородного материала, которым является бетон. Вывод расчетных формул дается на основе классических представлений гипотезы плоских сечений, что отвечает реальным эксплуатационным условиям бетонных причалов и поставленным задачам. В противном случае эти расчетные формулы позволят получить результаты, обеспечивающие запас прочности конструктивных элементов.

Для изгибаемых элементов со сплошным по длине поверхностным повреждением (рис. 2) соотношение (1) принимает вид:

$$n = \Delta M/M_n, \quad (2)$$

где ΔM – разность между величиной M и проектным изгибающим моментом M_n ;

M_n – изгибающий момент, который способен воспринять неповрежденный элемент в рассматриваемом сечении.

$$M = R_p W, \quad (3)$$

где R_p – реальное расчетное сопротивление материала (например, бетона на растяжение);

W – момент сопротивления расчетного сечения.

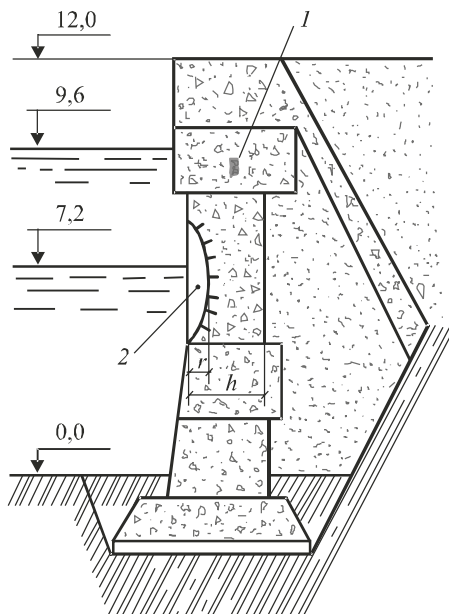


Рис. 2. Схема бетонного причала для расчета предельно допустимой глубины повреждения конструкции

1 – сборные или монолитные элементы причала; 2 – разрушенный участок бетона

Для сечения прямоугольной формы, если расчет ведется на 1 м длины сооружения (причальные набережные, стенки камер шлюзов и т. п.):

$$M = R_p h^2 / 6, \quad (4)$$

где h – высота расчетного сечения элемента.

В результате появления повреждения глубиной r толщина элемента в расчетном сечении уменьшилась и изгибающий момент, который сечение может воспринять:

$$M_{\text{пов}} = R_p (h - r)^2 / 6. \quad (5)$$

Несущая способность элемента при этом уменьшилась на величину

$$\delta M = M - M_{\text{пов}} = R_p r (h - r/2) / 3. \quad (6)$$

В соответствии со сформулированным выше общим положением предельно допустимым будет такое повреждение, при котором несущая способность элемента становится равной проектной:

$$\Delta M = \delta M. \quad (7)$$

Внося в условие (7) значения ΔM из формулы (2) и δM из формулы (6) и учитывая соотношение (3), получаем:

$$r^2 - 2rh + nh^2 = 0,$$

откуда

$$r = h(1 - \sqrt{1 - n}). \quad (8)$$

Формула (8) позволяет вычислить глубину поверхностного повреждения r , при которой несущая способность элемента снижается на допустимое значение. Значит, если действительная глубина повреждения изгибаемого элемента достигла значения r , то элемент нуждается в ремонте.

При выводе формулы (8) не принимался в расчет фактор концентрации напряжений в зоне повреждения. С целью выяснения вопроса о возможности использования полученной формулы для расчета бетонных конструкций были выполнены широкие полунатурные, лабораторные и теоретические исследования. Результаты исследований подтвердили, что формула вполне приемлема для практических целей [9–11].

Рассматриваемые положения особенно важны для бетонных конструкций, поскольку прочность бетона эксплуатируемых сооружений зачастую существенно меняется во времени.

Здесь аналогично тому, как это было сделано при выводе формулы (8):

$$r = h(1 - \sqrt{(1 - n) / k_t}). \quad (9)$$

При $k_t = 1$ формула (9) превращается в формулу (8). Формула (9) действительна и в тех случаях, когда все запасы прочности определяются только повышенной прочностью бетона ($n = 0$).

Для сжато-растянутых элементов со сплошным по длине поверхностным повреждением (рис. 3) соотношение (1) принимает вид:

$$n = \Delta N / N, \quad (10)$$

где ΔN – разность между осевой силой N , которую способен воспринять неповрежденный элемент конструкции, и проектным значением продольной силы N_n , т. е. $\Delta N = N - N_n$.

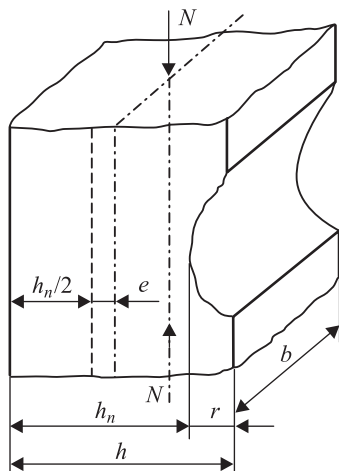


Рис. 3. Расчетная схема сжатого элемента из однородного материала

$$N = Rhb, \quad (11)$$

где R – расчетное сопротивление материала соответственно сжатию или растяжению в зависимости от вида осевой силы;

b – ширина расчетного сечения.

Продольная сила $N_{\text{пов}}$, которую может воспринять сечение после получения повреждения с учетом появляющегося эксцентриситета e приложения силы N :

$$N_{\text{пов}} = R(h - r)^2b/(h + 2r). \quad (12)$$

При этом

$$\delta N = N - N_{\text{пов}} = Rb(4rh - 2r)/(h + 2r); \quad (13)$$

$$\Delta N = \delta N. \quad (14)$$

Подставляя в условие (14) значение ΔN , найденное из формулы (10), и δN из формулы (11) и решая его относительно r , получаем:

$$R = h(2 - n - \sqrt{4 - 5n + n^2}). \quad (15)$$

Для изгибаемых элементов с разряженными по длине поверхностными повреждениями определение несущей способности представляет собой достаточно сложную задачу, которая может быть решена поэтапно для отдельных участков причального сооружения.

После вычисления величины реального разрушения бетона и определения запаса его работоспособности в течение определенного периода времени назначают возможные сроки ремонтно-восстановительных работ. В качестве рекомендаций по защите и восстановлению целостности бетонных причальных объектов представлены следующие мероприятия:

применение гидрофобных добавок в бетоны и растворы при ремонте и реконструкции;

обязательная предварительная промывка и рассев песчано-гравийных смесей, используемых для приготовления бетона;

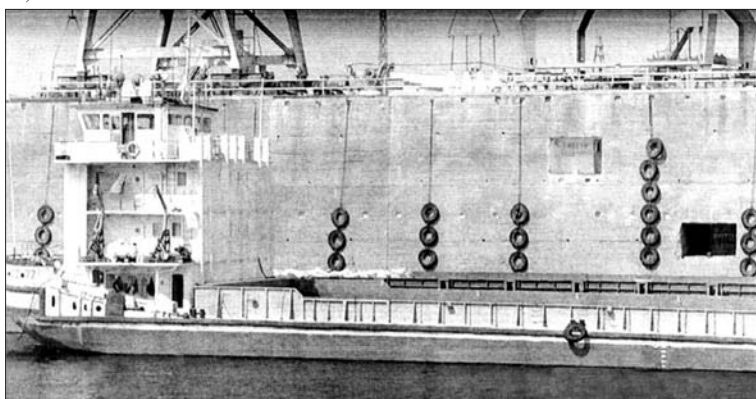
строгое соблюдение требований по укладке бетона и тщательное уплотнение бетонной смеси;

осуществление контроля качества бетона и бетонных работ на всех этапах производства;

использование защитных полимерсиликатных составов со специальными добавками направленного действия, обеспечивающими водостойкость, морозостойкость и высокую адгезию с бетоном [3, 6, 8].

Кроме того, рекомендованные защитные составы подбирались с учетом коэффициента линейного температурного расширения существующих бетонов с целью обеспечения совместной работы в условиях перепада температур от положительных в летнее время (+40 °С) до значительных отрицательных в зимний период (до -50 °С). Разработаны ремонтные составы для различных бетонов по прочности, пористости и эксплуатационным характеристикам [7].

а)



б)

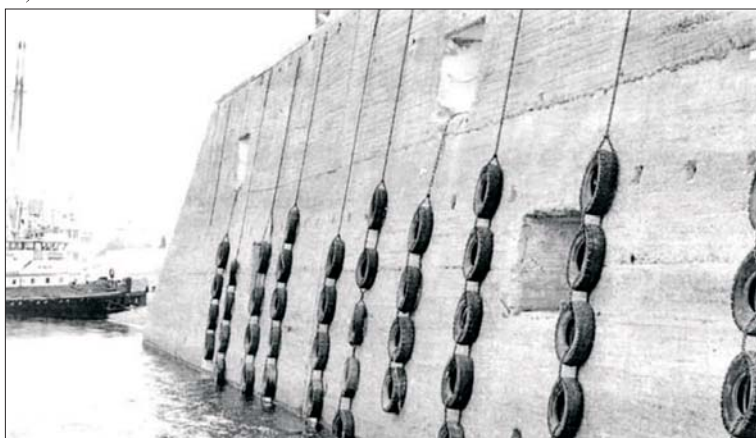


Рис. 4. Внешний вид части бетонного причального сооружения (г. Ленск), обработанного защитным составом с дегидролом и микро-сферами после трех (а) и семи лет (б) эксплуатации

Положительным примером реализации данных рекомендаций является применение защитных полимерсиликатных составов с дегидролом и микро-сферами при ремонтно-восстановительных работах в речном порту г. Ленска в 2011–2015 гг. (рис. 4).

Исследования осуществлялись на композициях с минеральными наполнителями, введение которых обеспечивало резкое снижение усадочных деформаций, а также способствовало выравниванию коэффициентов линейного температурного расширения защитной композиции и бетонного основания. В качестве наполнителей в целях снижения усадочных напряжений были использованы: молотый речной песок, отходы хризотилцементного производства, цемент, молотый керамзит, а также полимерминеральная добавка «дегидрол» и наноразмерные композиции – растворы кремнезоля и углеродных нанотрубок (УНТ). Такие составы обладают повышенной адгезионной способностью к бетонному основанию и высокими защитными свойствами. Разработаны пропиточные составы и покрытия для противокоррозионной защиты бетонных и железобетонных причальных конструкций, подверженных интенсивному воздействию водных сред и температурных перепадов, которые состоят из нескольких компонентов на основе

полимерсиликатных составов – дисперсии ПВА и жидкого натриевого стекла [2].

Рекомендованные к использованию полимерсиликатные композиции с добавками направленного действия для усиления существующих целых и имеющих начальные следы разрушения бетонных плит и стенок причалов позволяют продлить сроки службы портовых сооружений, обеспечивают их надежную эксплуатацию и способствуют повышению эффективности капитальных вложений. Благодаря аналитическим расчетам по вышеприведенным формулам, можно спланировать сроки выполнения ремонтно-восстановительных работ и обеспечить бесперебойную эксплуатацию речных причальных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пичугин А.П., Балаш В.В., Шаталов А.А. Коррозия монолитного бетона причальных сооружений // Ресурсы и ресурсосберегающие технологии в строительном материаловедении: Междунар. сб. науч. тр. НГАУ–РАЕН–АПК. Новосибирск, 2016. С. 180–185.
2. Шаталов А.А., Никитенко К.А., Пичугин А.П. Состояние бетонных причалов, эксплуатируемых в суровых условиях Сибири // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 10. С. 71–79.
3. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Шаталов А.А., Балаш В.В., Мишутин А.В. Технология защиты бетонных и железобетонных причальных конструкций, эксплуатируемых в суровых климатических условиях // Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении: Междунар. сб. науч. тр. НГАУ–РАЕН–АПК. Новосибирск, 2017. С. 234–237.
4. Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.
5. Бабков В.В. и др. Механизм упрочнения цементных связок при использовании тонкодисперсных заполнителей // Цемент. 1991. № 9-10. С. 34–41.
6. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А.В. Ущерова-Маршака. Харьков: Колорит, 2005. 280 с.
7. Пичугин А.П., Городецки С.А., Бареев В.И. Коррозионностойкие материалы для защиты полов и инженерных систем сельскохозяйственных зданий и сооружений: монография. Новосибирск: НГАУ–РАЕН, 2010. 142 с.
8. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Шаталов А.А., Никитенко К.А. Физико-химические исследования процессов коррозионного разрушения бетона причальных сооружений // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 11. С. 69–77.
9. Будин А.Я., Чекрыгина М.В. Усиление портовых сооружений. М.: Транспорт, 1983. 179 с.
10. Будин А.Я. Эксплуатация и долговечность портовых гидротехнических сооружений. М.: Транспорт, 1977. 318 с.
11. Будин А.Я. Тонкие подпорные стенки для условий Севера. Л.: Стройиздат, 1982. 288 с.

Пичугин Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный аграрный университет
Шаталов Антон Александрович, асп.
Новосибирский государственный аграрный университет

Получено после доработки 18.04.2019

Pichugin Anatoliy Petrovich, DSc, Professor
Novosibirsk State Agricultural University, Russia
Shatalov Anton Aleksandrovich, Post-graduate Student
Novosibirsk State Agricultural University, Russia

CALCULATION OF TERMS OF REPAIR OF CONCRETE BERTHING FACILITIES FOR RESTORATION OF THEIR OPERATIONAL SUITABILITY

The destructions of concrete mooring massifs established during inspection, identification of the increased total porosity testifying to high extent of corrosion process in material testify to need of objective calculation of terms of repair and restoration of these objects. Analytical and practical options of assessment of terms of repair and restoration of concrete taking into account all factors and a variety are presented in article. The procedure of payments is defined and settlement formulas for purpose of extent of destruction are given that allows to develop recommendations about maintenance of concrete objects. Polimersilikatny compositions with additives of the directed action the ensuring safety and operational suitability of berthing facilities with various extent of destruction are offered.

Key words: concrete destruction, concrete corrosion, maximum permissible depth of damages, bearing capacity of berthing facilities, porosity, water tightness, frost resistance, durability of berthing facilities.

REFERENCES

1. Pichugin A.P., Balash V.V., Shatalov A.A. Korroziya monolitnogo betona prichal'nykh sooruzheniy [Corrosion of monolithic concrete of berthing facilities]. Resursy i resursosberegayushchiye tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov NGAU–RAEN–APK [Resources and resource-saving technologies in construction materials science. International collection of scientific papers NSAU–RANS–ASK]. Novosibirsk, 2016. Pp. 180–185. (in Russian)
2. Shatalov A.A., Nikitenko K.A., Pichugin A.P. Sostoyaniye betonnykh prichalov, ekspluatiruemykh v surovyykh usloviyakh Sibiri [A condition of the concrete moorings operated in severe conditions of Siberia]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 10. Pp. 71–79. (in Russian)
3. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Shatalov A.A., Balash V.V., Mishutin A.V. Tekhnologiya zashchity betonnykh i zhelezobetonnykh prichal'nykh konstruktsiy, ekspluatiruemykh v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Tekhnologiya of protection of the concrete and reinforced mooring structures operated in severe climatic conditions]. Effektivnyye retseptury i tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov NGAU–RAEN–APK [Effective compoundings and technologies in construction materials science. International collection of scientific papers NSAU–RANS–ASK]. Novosibirsk, 2017. Pp. 234–237. (in Russian)
4. Solomatov V.I., Selyaev V.P. Khimicheskoye soprotivleniye kompozitsionnykh materialov [Chemical resistance of composite materials]. Moscow, Stroyizdat, 1987. 264 p. (in Russian)
5. Babkov V.V. Mekhanizm uprochneniya tsementnykh svyazok pri ispol'zovanii tonkodispersnykh zapolniteley [The mechanism of hardening of cement sheaves when using fine fillers]. Tsement [Cement]. 1991. No. 9-10. Pp. 34–41. (in Russian)

6. Khimicheskiye i mineral'nyye dobavki v beton [Chemical and mineral additives in concrete]. Under the edit. of A.V. Usharov-Marshak. Kharkiv, Colorit. 2005. 280 p. (in Russian)
7. Pichugin A.P., Gorodetskiy S.A., Bareev V.I. Korroziionnostoykiye materialy dlya zashchity polov i inzhenernykh sistem sel'skokhozyaystvennykh zdaniy i sooruzheniy: monografiya [Corrosion-resistant materials for protection of floors and engineering systems of agricultural buildings and constructions: monograph]. Novosibirsk, NSAU-RANS, 2010. 142 p. (in Russian)
8. Pichugin A.P., Khritankov V.F., Shatalov A.A., Nikitenko K.A. Fiziko-khimicheskiye issledovaniya protsessov korroziionnogo razrusheniya betona prichal'nykh sooruzheniy [Physical and chemical researches of processes of corrosion destruction of concrete of berthing facilities]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Education Institutions. Construction]. 2018. No. 11. Pp. 69–77. (in Russian)
9. Budin A.Ya., Chereneva M.V. Usileniye portovykh sooruzheniy [Strengthening of port constructions]. Moscow, Transport, 1983. 179 p. (in Russian)
10. Budin A.Ya. Eksploatatsiya i dolgovechnost' portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Operation and durability of port hydraulic engineering constructions]. Moscow, Transport, 1977. 318 p. (in Russian)
11. Budin A.Ya. Tonkiye podpornyye stenki dlya usloviy Severa [Thin retaining walls for North conditions]. Leningrad, Stroyizdat, 1982. 288 p. (in Russian)