

КОНТРОЛЬ СОСТАВА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ ПУТЕМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2022 г. М.М. Матлин^{1,*}, Е.Н. Казанкина¹, В.А. Казанкин¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Россия 400005 Волгоград, пр-т Ленина, 28
E-mail: *matlin@vstu.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022; после доработки 06.06.2022

Принята к публикации 17.06.2022

Описан метод контроля количества цемента в изделиях из цементно-песчаной смеси по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. Показано, что для материалов из цементно-песчаной смеси в достаточно широком диапазоне изменения глубин остаточных отпечатков и контактных нагрузок при внедрении сферического индентора справедлива линейная зависимость глубины остаточного отпечатка от нагрузки. Это позволило использовать для разработанного метода контроля закономерности пластической твердости.

Ключевые слова: цементно-песчаная смесь, сферический индентор, контактная нагрузка, упругопластическая контактная деформация, пластическая твердость.

DOI: 10.31857/S0130308222080061, EDN: BQUTRS

ВВЕДЕНИЕ

Строительство и эксплуатация промышленных и гражданских объектов предусматривает регулярный мониторинг качества используемых материалов и изделий на всех этапах жизненного цикла: от изготовления до утилизации. В связи с этим разработка оперативных методов контроля свойств строительных материалов остается актуальной задачей. Задача обеспечения контроля качества строительно-монтажных работ является актуальной не только в России, но в зарубежных странах: подробное сопоставление систем управления качеством строительства в различных странах (России, Германии, Финляндии, Японии, Великобритании, США) приведено в работе [1].

В настоящее время методы оперативного неразрушающего контроля достаточно широко используются, в том числе и в строительной отрасли: акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, радиационный, радиоволновой и др. [2]. Следует отметить, что эти методы определяют объемные свойства материала и требуют предварительной тарировки по результатам традиционных механических испытаний. Поскольку очаги разрушения зарождаются, как правило, на поверхности элементов конструкций, то наиболее информативными являются методы, позволяющие определять физико-механические свойства материала непосредственно на поверхности. Такие методы в настоящее время также применяют на практике. Так, например, согласно [3], для неразрушающего контроля прочности бетона используют методы контактного нагружения: упругого отскока, пластической деформации, ударного импульса; в качестве оборудования применяют склерометр Шмидта [4] или его аналоги, молоток Кашкарова, приборы типа ОНИКС (НПП «Интерприбор» г. Челябинск) и др. В работе [5] приведен обзор наиболее распространенных методов неразрушающего контроля бетонных конструкций, используемых в строительной отрасли. В работе [6] отмечено, что испытание путем внедрения сферического индентора является многообещающим дополнительным инструментом для определения характеристик строительных материалов.

Одним из основоположников исследования аналитических взаимосвязей параметров упругопластического внедрения сферического индентора со свойствами испытуемого материала является академик А.Ю. Ишлинский [7]. Эти исследования были продолжены и развиты в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых. Ряд полученных результатов включены в действующие стандарты и руководящие документы, например, [8, 9]. Следует отметить, что описанные методы предназначены для контроля металлов и сплавов. Что же касается строительных материалов, то такие методы также активно разрабатываются в настоящее время. В работе [10] приведен обзор использования метода внедрения индентора для отдельного определения свойств различных фаз асфальтобетона. В работе [11] описана методика определения свойств ряда строительных вязкоупругих материалов: полиоксиметиленовых, битумных и битумно-наполнительных мастик с помощью сферического инструментального теста на вдавливание. Разработанный метод позволяет измерять две независимые вязкоупругие функции — модуль релаксации сдвига и коэффициент Пуассона. В работе [12] методом микроиндентирования выполнен анализ влияния температу-

ры на ползучесть цементных растворов. В работе [13] также путем вдавливания индентора исследовали ползучесть цементных материалов в масштабах от нано- до микрометров. Это исследование выполнено с целью установить связь макроскопических свойств бетона с лежащими в его основе нано- и микроструктурами и фазами. В работе [14] исследовали влияние состава смеси на твердость бетонной поверхности в условиях зимней эксплуатации при использовании агрессивных антиобледенительных химикатов. Установлена корреляция между твердостью поверхности и свойствами бетона на сопротивление поверхностному истиранию при использовании в качестве дорожного покрытия.

Цементно-песчаные смеси широко используют для изготовления бетона, кирпичной кладки, балок, плит перекрытий, заливки полов, штукатурки, изготовления черепицы, а в последнее время и для 3D-печати зданий [15]. Состав цементно-песчаных смесей регламентирован стандартом [16]; при этом соотношение цемента и песка в них может существенно отличаться. Следует отметить, что на прочность цементно-песчаных смесей оказывает влияние много различных факторов: происхождение песка, размер его частиц, марка цемента и т.п. В работе [17] исследовано влияние морского песка (менее дефицитного по сравнению с речным песком) как мелкого заполнителя на механические и прочностные свойства цементного раствора и бетона. Испытания по определению прочности на сжатие, модуля упругости цементного раствора и бетона показали, что использование морского песка вполне допустимо.

В работе [18] показано, что количество песка оказывает непосредственное влияние на строительные характеристики смеси, прочность и долговечность затвердевшего бетона. Установлено оптимальное значение количества песка при котором прочность цементно-песчано-гравийного материала является наибольшей.

В работе [19] исследовано влияние на свойства высокопрочного бетона изменения соотношения песка и заполнителя при одинаковом водоцементном соотношении. Авторы провели эксперименты по выявлению влияния на текучесть, сопротивление отрыву, прочность, модуль Юнга, усадку при высыхании и долговечность высокопрочного бетона при изменении соотношения песка и общего заполнителя. Установлено, что возможно получение бетона требуемого качества, даже если отношение песка к сумме заполнителей будет несколько увеличено в пределах, при которых сопротивление отрыву не ухудшается.

В работе [20] отмечено, что в современной строительной отрасли запасы природного песка истощаются из-за быстрых изменений в строительной деятельности. Кроме того, песок хорошего качества, возможно, придется транспортировать на большие расстояния, что увеличивает стоимость строительства. Таким образом, становится неизбежным использование альтернативных материалов для мелких заполнителей, которые включают переработанные заполнители, искусственный песок, дробленый каменный порошок и т. д. В работе экспериментально исследовано влияние замены природного песка промышленным песком на свойства цементного раствора со смесью 1:2, 1:6 и 1:3. Показано, что искусственный песок можно рекомендовать для замены природного речного песка в цементном растворе до 80 %. В работе [21] исследовано влияние величины песчинок на прочностные характеристики цементного раствора. Установлено, что образцы с более крупной фракцией песка получили более высокую прочность на сжатие через 7 и 28 дней, чем образцы с более мелкой фракцией песка. Однако, когда использовалось более высокое отношение воды к цементу (0,65—0,67), образцы с более мелкой фракцией песка достигли более высоких пределов прочности при длительном сжатии, изгибе и растяжении при раскалывании, чем образцы с более крупной фракцией песка.

В работе [22] проведена разрушающая и неразрушающая оценка бетона для оптимального соотношения объема песка и заполнителя. Заполнители вносят наибольший вклад в объем бетона и являются решающим параметром, определяющим его механические свойства. Определяли прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости. Установлено, что оптимальное соотношение песка и заполнителя составило 0,40 и 0,44 для максимального размера заполнителя 12 и 19 мм соответственно, независимо от соотношения вода—цемент.

В работе [23] исследована форма частиц промышленного песка, текстура поверхности и поведение в бетоне. Установлено, что бетон на основе промышленного песка имеет большую прочность по сравнению с бетоном на основе речного песка.

В работе [24] исследовано влияние соотношения песок/заполнитель на прочность, долговечность и микроструктуру самоуплотняющегося бетона. Испытания проводились на образцах при пяти соотношениях песок/заполнитель: 51, 52, 53, 54 и 55 %. Установлено, что большая доля крупного заполнителя улучшила механические свойства на 10 % по сравнению с контрольными образцами (соотношение песок/заполнитель 52 %).

Согласно [25], предусмотрены различные испытания строительных растворов как в процессе изготовления, так и после затвердевания: определение подвижности, средней плотности, предела прочности и др. Недостатком этих методов является то, что они только косвенно оценивают количество цемента в цементно-песчаной смеси. В то же время известно, что одним из существенных параметров, определяющим конечную надежность и прочность строительной конструкции, является именно количество цемента, содержащееся в строительном растворе. В работе [26] предложен способ определения количества цемента в грунтоцементном материале конструкции путем добавления в цементный раствор порошкообразного индикатора — графита и последующего определения электропроводности раствора. Очевидно, что контроль количества цемента этим методом может происходить только в процессе заливки раствора. Таким образом, научной задачей является исследование закономерностей упругопластического внедрения индентора в поверхность строительных материалов (в данной работе цементно-песчаной смеси) с целью определения свойств готовых строительных изделий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе для исследования соотношения цемента и песка на готовых изделиях путем упругопластического внедрения сферического индентора было предложено использовать методику, описанную в работах [27, 28]. Как известно, из всех методов испытания путем внедрения сферического индентора только число пластической твердости, определяемое по действующему стандарту [28], не зависит от условий испытания (в широком диапазоне изменения контактных нагрузок и диаметра сферического индентора) и, следовательно, является константой для данного материала. Это свойство пластической твердости базируется на линейной зависимости глубины остаточного отпечатка от контактной нагрузки. Несмотря на очевидные преимущества пластической твердости, возможность ее использования для строительных материалов не является очевидной и требует проведения дополнительных исследований. В связи с этим предварительно был экспериментально изучен характер зависимости глубины остаточного отпечатка от контактной нагрузки при упругопластическом внедрении сферического индентора в изделия из цементно-песчаной смеси. В практическом плане это исследование также является актуальным, поскольку позволит оперативно и без разрушения контролировать качество цементно-песчаной смеси как после изготовления строительных сооружений, так и при проведении мониторинга реального состояния строительных конструкций после длительной эксплуатации или воздействия различных внешних факторов: землетрясение, пожар и т.п. Следует подчеркнуть, что завышение марки раствора приводит к созданию излишнего запаса прочности и вызывает увеличение стоимости строительства и необоснованный перерасход цемента, а занижение марки приводит к тому, что возведенные конструкции обладают недостаточной прочностью и жесткостью, что во время их эксплуатации приводит к появлению трещин, больших прогибов или даже к авариям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментального исследования выбрали составы плиток из цементно-песочной смеси, наиболее часто используемые на практике; соотношение цемента и песка: для кладки кирпича — 1 часть цемента и 1,5 или 3 части песка; для стяжек — 1 часть цемента и 2 или 3 части песка; для штукатурки — 1 часть цемента и 3 части песка и др. При этом марки цемента по прочности могут отличаться. Смеси при соотношении песка и цемента 5:1 и выше (так называемые тощие смеси) используются редко, поскольку медленно застывают и имеют склонность осыпаться со временем. Для изготовления плиток из цементно-песочной смеси использовали цемент марки М500 [29] и речной песок, который по значению модуля крупности [30] относится к группе песка «очень мелкий». Подготовленную смесь перемешивали миксером и заливали в подготовленные формы. Изготовленные плитки имели толщину 80 мм, что соответствует требованию стандарта [3] при использовании метода пластических деформаций. В качестве индентора использовали закаленный стальной шарик (из стали ШХ-15) с твердостью по Виккерсу не менее HV850 кгс/мм² и диаметром 10 мм. Нагружение проводили с помощью прессы Бринелля ТШ-2. Глубину остаточных отпечатков измеряли с помощью индикатора часового типа (с ценой деления 0,001 мм), установленного в индикаторной стойке. Расстояние между отпечатками — не менее 30 мм, число повторных нагружений — 5 [3]. Испытания проводили через 28 суток после затвердевания смеси, когда смесь достигает проектной прочности.



Рис. 1. Поверхность плитки из цементно-песчаной смеси с остаточными отпечатками от сферического индентора.

На рис. 1 показана поверхность плитки из цементно-песчаной смеси с остаточными отпечатками от сферического индентора.

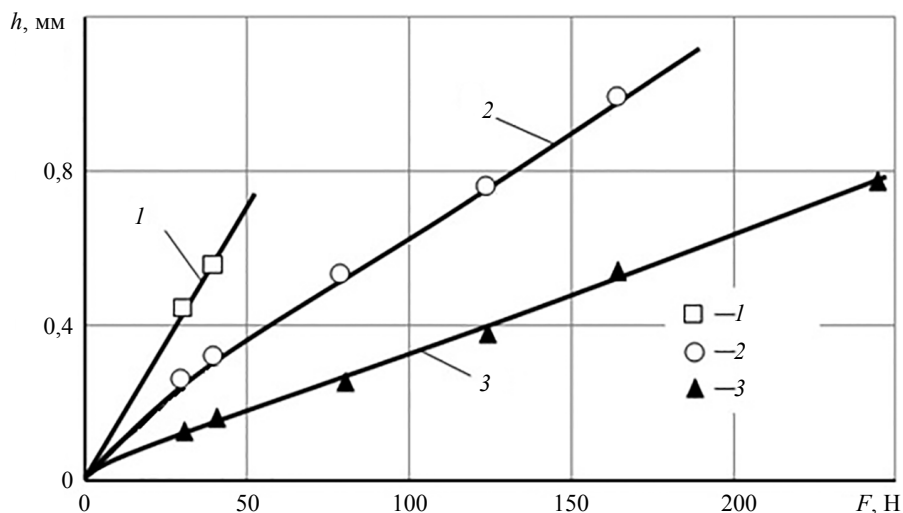


Рис. 2. Графики экспериментальных зависимостей глубин h остаточных отпечатков от контактной нагрузки F при внедрении стального сферического индентора (диаметром 10 мм) в поверхности плиток: кривая 1 соответствует цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов 1 к 3; кривая 2 соответствует цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов 1 к 1; кривая 3 соответствует плитке из чистого цемента.

На рис. 2 показаны графики экспериментальных зависимостей глубин h остаточных отпечатков от контактной нагрузки F при внедрении стального сферического индентора (диаметром 10 мм) в поверхности ряда плиток из цементно-песчаной смеси.

Из рис. 2 видно, что для плиток из цементно-песчаной смеси зависимость $h(F)$ имеет линейный характер (по крайней мере, до глубин $h = (0,08—0,10)D$, где D — диаметр сферического индентора), а, следовательно, для них может быть определено и значение пластической твердости согласно стандарту [28]. В табл. 1 для всех исследованных цементно-песчаных плиток пластическую твердость НД [28] вычисляли по формуле:

Расчет пластической твердости НД цементно-песчаных плиток

Соотношение песка и цемента мате- риала плитки	Контактные нагрузки, Н		Глубины остаточных отпечатков, мм		Пластическая твердость НД, МПа, см. (1)
	F_1	F_2	h_1	h_2	
3:1	613	818	0,440	0,574	49
2,5:1	613	818	0,325	0,434	60
2:1	818	1643	0,320	0,680	73
1,5:1	818	1643	0,290	0,585	89
1:1	1643	3270	0,520	0,950	120
0,5:1	1643	3270	0,310	0,670	144
0:1	1643	3270	0,250	0,510	199

$$\text{НД} = \frac{F_2 - F_1}{\pi D(h_2 - h_1)}, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 — нагрузки на сферический индентор; h_1 и h_2 — отвечающие им глубины остаточных отпечатков; D — диаметр сферического индентора.

Результаты, приведенные в табл. 1, проиллюстрированы графически на рис. 3. Эти результаты можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$C = 0,0887\text{НД}^{1,312} + 8, \quad (2)$$

где C — процент содержания цемента в плитке из цементно-песчаной смеси.

Как видно из рис. 3 погрешность при использовании зависимости (2) в большинстве случаев не превышает (2—6)% по сравнению с экспериментальными данными, приведенными в табл. 1.

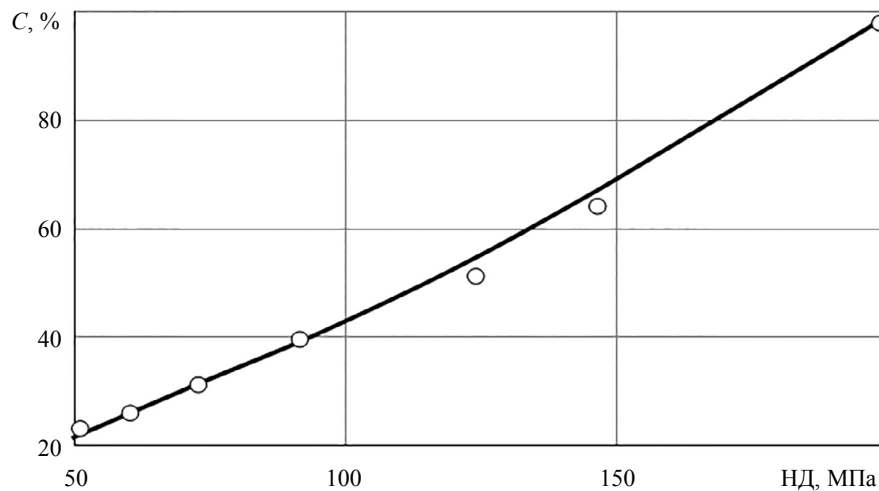


Рис. 3. График зависимости содержания цемента C в плитке из цементно-песчаной смеси в зависимости от пластической твердости НД плитки: значки — данные табл. 1; линия — расчет по формуле (2).

Следует отметить, что для определения твердости можно использовать как стационарные, так и переносные твердомеры [31]. Для готовых крупногабаритных строительных изделий целесообразно использовать переносной вакуумный твердомер [32, 33], в котором закрепление на контролируемой поверхности и создание рабочей нагрузки реализуют при помощи атмосферного давления. Общий вид вакуумного твердомера показан на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид вакуумного твердомера.

Диаметральные размеры вакуумного твердомера определяются необходимой величиной рабочей нагрузки на индентор. Для создания рабочей нагрузки в 1 Н требуется 12—13 мм² активной площади верхней крышки твердомера [34]. Таким образом, например, при необходимой величине рабочей нагрузки $F = 981$ Н необходимый диаметр верхней крышки твердомера составит ~130 мм, а при $F = 4905$ Н — ~285 мм, что вполне приемлемо для переносного твердомера, предназначенного для контроля крупногабаритных строительных изделий. Для создания вакуума в полости твердомера можно использовать вакуум-насос ВН-461М или НВР-1,25Д, а также их аналоги.

Вакуумный твердомер работоспособен при любой ориентации в пространстве с возможностью самоустанавливания на поверхности детали, что позволяет применять его в сочетании с исполнительными органами робототехнических устройств. Возможно также использование твердомера для дистанционного контроля; для этого необходимо в качестве датчика перемещений установить, например, индуктивный датчик.

Необходимо отметить, что наиболее достоверное определение твердости металла обеспечивается прямыми статическими методами измерения, выполняемыми согласно действующим стандартам; все остальные методы в той или иной степени являются косвенными, основанными на корреляции различных механических и физических параметров с характеристиками твердости, определенными прямыми методами. При применении твердомеров статического действия обеспечивается также и наименьшая погрешность измерения твердости.

ВЫВОДЫ

Установлено, что для материалов из цементно-песчаной смеси в достаточно широком диапазоне изменения глубин остаточных отпечатков при внедрении сферического индентора и контактных нагрузок справедлива линейная зависимость глубины остаточного отпечатка от нагрузки. Это

позволяет использовать закономерности пластической твердости для контроля содержания цемента в этих материалах. При использовании иных сочетаний марок цемента и песка следует дополнительно экспериментально устанавливать количественную зависимость процентного содержания цемента от пластической твердости. В тоже время в массовом строительстве используется относительно небольшое количество сочетаний марок цемента и песка, для которых можно предварительно установить соответствующую зависимость по описанной методике.

Работа выполнена в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента России № МК-84.2021.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Поletaев К.Н., Юферева А.Д.* Сравнение отечественной и зарубежной систем управления качеством строительства // StudArctic forum. № 1 (5). 2017. С. 65—76.
2. ГОСТ Р 56542—2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 30.10.2019.
3. ГОСТ 22690—2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Межгосударственный стандарт. Введ. 01.04.2016.
4. DIN EN 12504-2-2019-10. Испытания бетона в конструкциях. Часть 2. Неразрушающий контроль. Определение критерия отскока.
5. *Helal J., Sofi M., Mendis P.* Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods // Electronic Journal of Structural Engineering. 2015. V. 14. № 1. P. 97—105.
6. *Fadil H., Jelagin D.* Spherical indentation test for quasi-non-destructive characterisation of asphalt concrete. Part I // Materials and Structures. 2022. V. 3(55). № 102.
7. *Ишлинский А.Ю.* Осесимметричная задача пластичности и проба Бринелля // Прикладная математика и механика. 1944. Т. 8. Вып 3. С. 201—223.
8. ГОСТ Р 56474—2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Введ. 15.06.2015.
9. РД ЭО 0186-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса сосудов энергоблоков АЭС. М.: Концерн Росэнергоатом, 1999.
10. *Xu L., Sun D., Ma J., Sun G., Ling S., Hu M.* Applications of depthsensing indentation on asphalt materials: A review // Construction and Building Materials. 2021. V. 268. № 121195.
11. *Fadil H., Jelagin D., Larsson P.-L.* On the Measurement of two Independent Viscoelastic Functions with Instrumented Indentation Tests // Experimental Mechanics. 2018. V. 58. № 2. P. 301—314.
12. *Frech-Baronet J., Sorelli L., Chen Z.* A closer look at the temperature effect on basic creep of cement pastes by microindentation // Construction and Building Materials. 2020. V. 258. № 119455.
13. *Wei Y., Liang S., Gao X.* Indentation creep of cementitious materials: Experimental investigation from nano to micro length scales // Construction and Building Materials. 2017. V. 143. P. 222—233.
14. *Amini K., Sadati S., Ceylan H., Taylor P.* Effects of mixture proportioning, curing, and finishing on concrete surface hardness // ACI Materials Journal. 2019. V. 116. № 2. P. 119—126.
15. *Гришин В.А.* Анализ исследований состава цементно-песчаной смеси для 3D печати зданий. Технические науки: проблемы и решения / Сборник статей по материалам XLIV международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 64—68.
16. ГОСТ 28013—98. «Растворы строительные. Общие технические условия» (с изменением № 1, ИУС 11-2002). Введ. 01.07.1999.
17. *Karthikeyan G., Vijai K., Regin D.J.J.* Influence of marine sand as fine aggregate on mechanical and durability properties of cement mortar and concrete // Materials Research Express. 2022. V. 9 (3). № 035504.
18. *Li X., Zhang S., Wu H.* Study on the Material Properties of Cement-sand gravel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 513. № 012036.
19. *Nakata Y., Saito T., Kajita H., Otsuka S., Haruyama N.* Influence on properties of high-strength concrete by the change of sand-total aggregate ratio in identical water-cement ratio // Journal of Structural and Construction Engineering. 2018. V. 83 (748). P. 751—761.
20. *Mathew B., Freeda Christy C., Joseph B., Anuragi P.* An experimental study on properties of cement mortar by replacement of natural sand with manufactured sand // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2016. V. 7. № 4. P. 483—490.
21. *Lim S., Tan C., Chen K., Lee M., Lee W.* Effect of different sand grading on strength properties of cement grout // Construction and Building Materials. 2013. V. 38. P. 348—355.

22. *Mohammed T.U., Mahmood A.H., Mohammad Z.B.H., Joy J.A., Ahmed M.A.* Destructive and non-destructive evaluation of concrete for optimum sand to aggregate volume ratio // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021. V. 15. № 6. P. 1400—1414.
23. *Shen W., Yang Z., Cao L., Cao Liu, Liu Y., Yang H., Lu Z., Bai J.* Characterization of manufactured sand: Particle shape, surface texture and behavior in concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 114. P. 595—601.
24. *Lin W.* Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 242. № 118046.
25. ГОСТ 5802—86. «Растворы строительные. Методы испытаний». Введ. 01.07.1986.
26. *Гришко Д.А.* Патент 2513567 РФ МПК G01N 27/22. Способ определения количества цемента в грунтоцементном материале конструкции / Оpubл. 20.04.2014. Бюл. № 11.
27. *Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А.* Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 247 с.
28. ГОСТ 18835—73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 3-93, ИУС № 5/6, 1993 г.).
29. ГОСТ 31108—2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 1.03.2021 (введен вместо ГОСТ 10178—85 и ГОСТ 31108—2016).
30. ГОСТ 8736—2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Введ. 01.04.2015.
31. *Матюнин В.М.* Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 288 с.
32. *Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н., Костюков В.А.* Контроль твердости крупногабаритных металлоизделий (обзор публикаций) // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 10. С. 30—33.
33. *Дрозд М.С., Матлин М.М., Бугаевский М.В., Самарин С.Э.* А. с. № 1126838 МПК G01N 3/42. Устройство для определения твердости материалов / Оpubл. 30.11.1984. Бюл. № 44.
34. *Александров М.П.* Подъемно-транспортные машины. М.: Высшая школа, 1985. 520 с.