

УДК 666.94-16

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN lprvj

DOI 10.62980/2076-0655-2025-115-127

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЦЕМЕНТЫ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ

Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Зигангиров А.И.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

АННОТАЦИЯ

Вид и свойства цемента являются ключевыми факторами при разработке высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов (B80-B150 и более). Наиболее перспективным видом являются цементы низкой водопотребности (ЦНВ), превосходящие все промышленные цементы по технологическим, прочностным, экологическим и экономическим показателям, благодаря высокой дисперсности и эффекту низкой водопотребности. В статье представлены результаты разработки высокопрочных ЦНВ, предназначенных для получения высококачественных мелкозернистых бетонов нового поколения. Изучено состояние вопроса по актуальности темы исследования. Получены экспериментальные зависимости нормальной плотности и подвижности, прочности цементного камня и активности ЦНВ-100 (100%-ое содержание портландцемента) с удельной поверхностью от 5000 см²/г до 9500 см²/г, полученных совместным помолом стандартных цементов ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ 0 52,5Н с разным содержанием суперпластификатора «Полипласт ПК» (тип R). Оптимальные составы ЦНВ-100 на этих цементах достигают прочности цементного камня на сжатие, соответственно, 212 и 231 МПа и активности (прочность цементно-песчаного раствора) – 93 и 112 МПа при удельной поверхности 7300 см²/г и 6600 см²/г. Это позволяет рекомендовать их для получения высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокопрочные бетоны, УНПС, цементы низкой водопотребности, ЦНВ-100, цементный камень, нормальная плотность, прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Зигангиров А.И. Высокопрочные цементы низкой водопотребности // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 115-127. DOI 10.62980/2076-0655-2025-115-127, EDN lprvj

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

QH MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES

EDN lprvj

DOI 10.62980/2076-0655-2025-115-127

HIGH-STRENGTH LOW WATER DEMAND CEMENTS

Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Zigangirov A.I.

Kazan State University of Architecture and Engineering

ABSTRACT

The type and properties of cement are key factors in the development of high-strength and ultra-high-strength concretes (B80-B150 and higher). The most promising type is low water demand cement (LWDC), which surpasses all industrial cements in technological, strength, environmental and economic indicators due to high dispersion and the effect of low water demand. The article presents the results of the development of high-strength LWDC intended for obtaining high-performance fine-grained concretes of a new generation. The state of the art in terms of the relevance of the research topic is studied. Experimental dependencies of normal consistency and mobility, strength of cement stone and activity of LWDC-100 (100% Portland cement content) with a specific surface area from 5000 cm²/g to 9500 cm²/g obtained by joint grinding of standard cements CEM I 42.5N and CEM 0 52.5N with different contents of the superplasticizer "Polyplast PC" (type R) are obtained. Optimum compositions of LWDC-100 on these cements achieve compressive strength of cement stone of 212 and 231 MPa, respectively, and activity (strength of cement-sand mortar) – 93 and 112 MPa with a specific surface of 7300 cm²/g and 6600 cm²/g. This allows them to be recommended for obtaining high-strength and ultra-high-strength concretes.

KEY WORDS: high-strength concrete, UHPC, low water demand cements, LWDC-100, cement stone, normal consistency, strength

FOR CITATION: Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Zigangirov A.I. High-strength low water demand cements // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. 32, No2. – Pp. 115 – 127. DOI 10.62980/2076-0655-2025-115-127, EDN lprvj

ВВЕДЕНИЕ

Цементный бетон – основной конструкционный строительный материал во всем мире – его производство превышает 11 млрд. м³ в год, учитывая известный мировой объем производства цемента более 4 млрд. тонн. При этом главная цель совершенствования технологии бетона состоит в повышении его прочности и долговечности. Первой ступенью развития обычных бетонов (по международной терминологии NC – normal concrete) считаются высокопрочные бетоны (High Strength concrete – HSC), развитие которых привело к высококачественным бетонам (High-Performance concrete – HPC). Уникальным видом является самоуплотняющийся бетон (Self-Compacting Concrete – SCC) [1,2]. Последние три вида были получены путем совместного применения суперпластификаторов и пуццолановых добавок (микрокремнезема и других) [3,4]. В мировой практике наиболее совершенным видом считается сверхвысококачественный бетон УНПС (Ultra-high performance concrete). УНПС – быстро развивающийся в последние годы вид цементного композита с прочностью на сжатие более 150 МПа. Он обладает исключительными механическими свойствами и высокой долговечностью благодаря использованию цементирующей матрицы максимальной удельной плотности [4-6]. Все вышеперечисленные инновационные бетоны находят промышленное применение в высотном строительстве, дорожной инфраструктуре и уникальных архитектурных объектах.

Цемент, как основа бетона (вяжущее или матрица в его сложной иерархической структуре), выполняет основную функцию обеспечения прочности. Получение бетонов классов В100-В150 и более на основе традиционных общестроительных цементов классов по прочности 42,5 и 52,5 возможно, но проблематично, так как требует повышенного расхода вяжущего, тщательного подбора минеральных добавок, кремнеземистых наполнителей и заполнителей [7].

Известно, что в формулах прочности бетона главными факторами, определяющими прочность бетона, являются активность цемента и водоцементное отношение В/Ц (или обратное – цементно-водное отношение Ц/В). Важную роль в бетоне играют нормальная густота цемента и прочность цементного камня.

Закономерно [8], что чем ниже величина начального водосодержания цементного теста, тем выше плотность цементного камня и его прочность. Именно нормальная густота (НГ) характеризует водопотребность цемента и реологию цементного теста (вязкость, тиксотропию). Физическая суть нормальной густоты цементного теста состоит в минимальном количестве воды, заполняющей весь объем между частицами цемента при их полном смачивании. Поэтому НГ принята в качестве основного критерия оценки водопотребности.

Учитывая все многообразие существующих видов цемента и их модификаций [9-12], по нашему мнению, наиболее перспективное направление совершенствования портландцементов – это развитие цементов низкой водопотребности (ЦНВ), получаемых путем помола портландцемента или его клинкера с минеральными добавками или без них совместно с пластификаторами. ЦНВ открывают новые возможности улучшения технологических и конструктивных свойств бетонов [13,14].

INTRODUCTION

Cement concrete is the main structural building material worldwide – its production exceeds 11 billion m³ per year, taking into account the known global cement production volume of over 4 billion tons. At the same time, the main goal of improving concrete technology is to increase its strength and durability. The first stage in the development of conventional concrete is considered to be high-strength concrete (HSC), the development of which led to high-performance concrete (HPC). A unique type is self-compacting concrete (SCC) [1,2]. The last three types were obtained by the combined use of superplasticizers and pozzolanic additives (microsilica and others) [3,4]. In world practice, the most advanced type is considered to be ultra-high performance concrete UHPC. UHPC is a rapidly developing type of cement composite with a compressive strength of over 150 MPa in recent years. It has exceptional mechanical properties and high durability due to the use of a cementing matrix of maximum specific density [4-6]. All of the above-mentioned innovative concretes find industrial application in high-rise construction, road infrastructure and unique architectural objects.

Cement, as the basis of concrete (binder or matrix in its complex hierarchical structure), performs the main function of providing strength. Obtaining concrete of classes B100-B150 and higher based on traditional general construction cements of strength classes 42.5 and 52.5 is possible, but problematic, since it requires increased consumption of binder, careful selection of mineral additives, siliceous fillers and aggregates [7].

It is known that in the formulas for the strength of concrete, the main factors determining the strength of concrete are the activity of cement and the water-cement ratio W/C (or the inverse – the cement-water ratio C/W). An important role in concrete is played by the normal consistency of cement and the strength of the cement stone.

It is natural [8] that the lower the initial water content of the cement paste, the higher the density of the cement stone and its strength. It is the normal consistency (NC) that characterizes the water demand of cement and the rheology of the cement paste (viscosity, thixotropy). The physical essence of the normal consistency of the cement paste is the minimum amount of water filling the entire volume between the cement particles when they are completely wetted. Therefore, NC is accepted as the main criterion for assessing water demand.

Considering the diversity of existing types of cement and their modifications [9-12], in our opinion, the most promising direction for improving Portland cements is the development of low water demand cements (LWDC), obtained by grinding Portland cement or its clinker with or without mineral additives together with plasticizers. LWDC opens up new possibilities for improving the technological and structural properties of concrete [13,14].

The scientific and technological foundations of LWDC (earlier name LWDB – low water demand binders) were developed by Soviet scientists in the late 1980s – 1990s of the last century (Sh. T. Babayev, N. F. Bashlykov, V. G. Batrakov, V. R. Falikman, etc.) [15]. For high-strength

Научно-технологические основы ЦНВ (раннее название ВНВ – вяжущие низкой водопотребности) были разработаны советскими учеными в конце 1980-х – 1990-х гг. прошлого века (Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков, В.Г. Батраков, В.Р. Фаликман и др.) [15]. Для высокопрочных бетонов представляют интерес ЦНВ-100 (100%-ое содержание цемента, не считая пластификатора). Именно ЦНВ-100 обладают наибольшей активностью, что необходимо для получения бетонов с высокими технологическими и эксплуатационными свойствами (УНПС). Процесс получения ЦНВ основан на механохимической активации компонентов при их совместном помоле [16,17]. При этом происходит «втирание» суперпластификатора в микродефекты частиц цемента и наполнителей, физическая адсорбция и хемосорбция [18]. В результате эффективнее используются как исходный цемент (или клинкер), так и пластификатор. Работы В.И. Калашникова [19-21] также позволяют объяснить высокую эффективность ПАВ их «преадапсорбционным» нанесением на образующуюся поверхность минерального материала при совместном помоле в мельнице (шаровой) с образованием наноразмерной адсорбционной пленки, обеспечивающей больший водоредуцирующий эффект, чем при обычном введении пластификаторов в воду затворения.

Для получения высокопрочной цементной матрицы важен фракционный состав вяжущего. Роль каждой фракции в процессе набора прочности цементного камня зависит от ее парциального содержания в бетонной смеси [22,23]. Наиболее активной частью портландцемента, влияющей на прирост прочности на начальных стадиях твердения, являются фракция размером 1–20 мкм, в которой самая тонкая фракция частиц до 5 мкм активнее всего участвует в гидратации в ранние сроки твердения цемента (до 7 сут), а марочную прочность обеспечивают частицы размером от 5 до 20-30 мкм (до 28 сут), фракция частиц >30 мкм практически не играет роли в активной стадии гидратации как в ранние сроки твердения, так и при достижении марочной прочности цемента [24-26]. В сравнении с рядовым портландцементом ЦНВ-100 обладают высокой дисперсностью и наибольшим содержанием тонкой фракции [27].

Преимущества ЦНВ подтверждаются в ряде работ [28-30], изучены свойства бетонов на их основе, в том числе модифицированных различными наполнителями и наноразмерными добавками. Однако, предельные возможности ЦНВ пока не достигнуты. Целесообразно провести исследование по модификации высокодисперсного ЦНВ-100. Учитывая это, большой интерес представляют дальнейшие исследования в раскрытии потенциала ЦНВ-100. В связи с чем были определены следующие **задачи исследования**:

- максимальное снижение водопотребности, зависящее от комплекса факторов: удельной поверхности, гранулометрии и концентрации СП в составе ЦНВ-100;
- достижение высокой прочности цементного камня и активности ЦНВ-100.

Цель исследования – получить высокопрочные цементы низкой водопотребности путем установления влияния суперпластификатора при получении ЦНВ-100 с широким интервалом удельной поверхности на нормальную плотность, подвижность цементного теста, прочность цементного камня и активность.

Материалы и методы исследования

Для получения цементов низкой водопотребности

concretes, LWDC-100 (100% cement content, excluding plasticizer) are of interest. It is LWDC-100 that has the highest activity, which is necessary for obtaining concrete with high technological and operational properties (UHPC). The process of obtaining LWDC is based on the mechanochemical activation of the components during their joint grinding [16,17]. In this case, the superplasticizer is “rubbed” into the microdefects of cement particles and fillers, physical adsorption and chemisorption occur [18]. As a result, both the original cement (or clinker) and the plasticizer are used more effectively. The works of V.I. Kalashnikov [19-21] also allow us to explain the high efficiency of surfactants by their “pre-adsorption” application to the resulting surface of the mineral material during joint grinding in a ball mill with the formation of a nano-sized adsorption film, providing a greater water-reducing effect than with the usual introduction of plasticizers into the mixing water.

To obtain a high-strength cement matrix, the fractional composition of the binder is important. The role of each fraction in the process of gaining strength of the cement stone depends on its partial content in the concrete mixture [22,23]. The most active part of Portland cement, affecting the strength gain at the initial stages of hardening, is the fraction of 1–20 μm , in which the finest fraction of particles up to 5 μm most actively participates in hydration in the early stages of cement hardening (up to 7 days), and the grade strength is provided by particles from 5 to 20-30 μm (up to 28 days), the fraction of particles >30 μm plays virtually no role in the active stage of hydration both in the early stages of hardening and when the grade strength of the cement is reached [24-26]. In comparison with ordinary Portland cement, LWDC-100 has a high dispersion and the highest content of the fine fraction [27].

The advantages of LWDC are confirmed in a number of works [28-30], the properties of concretes based on them have been studied, including those modified with various fillers and nanosized additives. However, the ultimate capabilities of LWDC have not yet been achieved. It is advisable to conduct research on the modification of highly dispersed LWDC-100. Given this, further research in revealing the potential of LWDC-100 is of great interest. In this regard, the following **research objectives** were defined:

- maximum reduction in water demand, depending on a set of factors: specific surface area, granulometry and concentration of superplasticizer in LWDC-100;
- achieving high strength of cement stone and activity of LWDC-100.

The purpose of the study is to obtain high-strength low water demand cements by establishing the effect of superplasticizer in the production of LWDC-100 with a wide range of specific surface area on normal consistency, mobility of cement paste, strength of cement stone and activity.

Materials and methods of research

To obtain low water demand cements (LWDC-100), industrial Portland cement (PC) of two classes and a superplasticizer based on polycarboxylate esters and its aqueous solutions were used.

(ЦНВ-100) применяли промышленный портландцемент (ПЦ) двух классов и суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров и его водные растворы.

Характеристика используемых материалов и веществ:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2020 с нормальной густотой цементного теста НГ=28% и удельной поверхностью $S_{уд}=3650 \text{ см}^2/\text{г}$, производства АО «Волга Цемент» (г. Вольск);

- Портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н ГОСТ 31108-2020 с нормальной густотой цементного теста НГ=27% и удельной поверхностью $S_{уд}=3600 \text{ см}^2/\text{г}$, производства ООО «Цементум Волга» (г. Вольск);

- суперпластификатор «Полипласт ПК» (тип R) (сокращенно «ПК-R») на основе поликарбоксилатных эфиров в форме водорастворимого порошка белого цвета с насыпной плотностью $670 \text{ кг}/\text{м}^3$ и в виде готового 50%-го водного раствора, соответствующий требованиям ТУ 20.59.59-098-58042865-2022, производства АО «Полипласт».

Для получения ЦНВ-100 применяли мельницу вибрационную СВМ-3, предназначенную для периодического измельчения порошкообразного или зернистого материала в лабораторных условиях, а также для моделирования процесса измельчения на промышленных мельницах. Объем помольной камеры СВМ-3 равен $0,1 \text{ м}^3$, имеется водяное охлаждение, загрузка материала по массе цемента составляет от 1 до 3 кг. Принцип действия вибрационных мельниц основан на приведении массы шаров и измельчаемого материала в круговое движение посредством вибратора, связанного с электродвигателем. Частицы материала, попадая в пространство между шарами, испытывают ударные и сдвигающие нагрузки.

Количественные составы исходных смесей для получения ЦНВ-100 принимались с учетом содержания суперпластификатора (СП) по сухому веществу к массе портландцемента – от 0,5 до 2% с шагом 0,25%. Время помола составляло от 2 до 20 мин.

При оценке подвижности цементного теста (ЦТ) следует помнить [8], что адсорбированная на поверхности минеральных частиц вода теряет молекулярную подвижность и уплотняется (до $1,8\text{--}2 \text{ г}/\text{см}^3$), переходя в твердopodobное состояние (слой Штерна). Поэтому, с ростом удельной поверхности цементов возрастает объемная доля адсорбционных слоев, уменьшается объем свободной воды, обеспечивающей подвижность ЦТ (водно-минеральной суспензии), и она снижается. При введении пластификатора в воду затворения его «крупные» (на один-два порядка) молекулы, имея преимущественную селективную адсорбцию на поверхности частиц цемента, вытесняют с неё часть молекул адсорбированной воды, повышая тем самым долю свободной, и увеличивают подвижность ЦТ [16]. В случае ЦНВ молекулы СП изначально «посаженные» на поверхность частиц цемента, препятствуют образованию адсорбционных слоев воды. Как следствие, увеличивается подвижность ЦТ. Исходя из этой картины, эффект ЦНВ должен зависеть от степени «занятости» (насыщения) поверхности цемента молекулами СП, а она будет снижаться с ростом удельной поверхности ЦНВ при постоянном проценте добавки, или возрастать при увеличении её содержания. Таким образом, эффект снижения водопотребности цемента при его совместном помолу с СП может напрямую оцениваться по нормальной густоте и В/Ц.

Characteristics of the materials and substances used:

- Portland cement CEM I 42.5N GOST 31108-2020 with normal cement paste consistency NC=28% and specific surface area $S_{sa}=3650 \text{ cm}^2/\text{g}$, manufactured by Volga Cement JSC (Volsk);

- Portland cement CEM 0 52.5N GOST 31108-2020 with normal cement paste consistency NC =27% and specific surface area $S_{sa}=3600 \text{ cm}^2/\text{g}$, manufactured by Cementum Volga LLC (Volsk);

- superplasticizer "Polyplast PC" (type R) (abbreviated "PC-R") based on polycarboxylate esters in the form of a water-soluble white powder with a bulk density of $670 \text{ kg}/\text{m}^3$ and in the form of a ready-made 50% aqueous solution, meeting the requirements of TC 20.59.59-098-58042865-2022, manufactured by JSC "Polyplast".

To obtain LWDC-100, a vibration mill SVM-3 was used, designed for periodic grinding of powder or granular material in laboratory conditions, as well as for modeling the grinding process in industrial mills. The volume of the grinding chamber of the SVM-3 is 0.1 m^3 , there is water cooling, the material loading by weight of cement is from 1 to 3 kg. The principle of operation of vibration mills is based on bringing the mass of balls and the crushed material into circular motion by means of a vibrator connected to an electric motor. Particles of material, getting into the space between the balls, experience impact and shear loads.

The quantitative compositions of the initial mixtures for obtaining LWDC-100 were taken into account taking into account the content of superplasticizer (SP) by dry matter to the mass of Portland cement - from 0.5 to 2% with a step of 0.25%. The grinding time was from 2 to 20 minutes.

When assessing the mobility of cement paste (CP), it should be remembered [5] that water adsorbed on the surface of mineral particles loses molecular mobility and is compacted (up to $1.8\text{--}2 \text{ g}/\text{cm}^3$), passing into a solid-like state (Stern layer). Therefore, with an increase in the specific surface of cements, the volume fraction of adsorption layers increases, the volume of free water providing the mobility of CP (water-mineral suspension) decreases, and it decreases. When a plasticizer is introduced into the mixing water, its "large" (by one or two orders of magnitude) molecules, having a predominant selective adsorption on the surface of cement particles, displace some of the adsorbed water molecules from it, thereby increasing the proportion of free water, and increase the mobility of CP [12]. In the case of LWDC, the SP molecules initially "planted" on the surface of cement particles prevent the formation of adsorption layers of water. As a result, the mobility of CP increases. Based on this picture, the effect of the LWDC should depend on the degree of "occupancy" (saturation) of the cement surface with SP molecules, and it will decrease with an increase in the specific surface of the LWDC at a constant percentage of the additive, or increase with an increase in its content. Thus, the effect of reducing the water demand of cement during its joint grinding with SP can be directly estimated by the normal consistency and W/C.

The normal consistency of the obtained LWDC-100 and initial cements was determined using the GOST 30744-2001 (GOST 30744-2001 "Cements. Test methods using polyfractional sand") (In Russian) method. The

Определение нормальной густоты получаемых ЦНВ-100 и исходных цементов проводилось по методике ГОСТ 30744-2001 (ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка»). Нормальной густотой цементного теста считают такую консистенцию, при которой пестик прибора Вика, при погружении в заполненное цементным тестом кольцо, не доходит на (6 ± 1) мм до пластинки, на которой установлено кольцо. Количество воды (в масс. % от Ц) при этом считается нормальной густотой цемента (НГ, %).

Оценка подвижности цементного теста (ЦТ) и влияние на нее удельной поверхности и содержания СП осуществлялась с помощью мини-конуса (рис. 1), аналогичного мини-конусу для определения пластифицирующей способности суперпластификатора С-3. Мини-конус представляет собой усеченный конус с верхним диаметром 20 мм и нижним диаметром 40 мм, высотой – 60 мм по следующей методике (рис. 2):

- 1) 100 г вяжущего затворяют 35 г воды ($В/Ц=0,35$) и тщательно перемешивают в течение 1 мин;
- 2) мини-конус помещают на стеклянную пластинку (все рабочие поверхности должны быть одинаково увлажнены) и заполняют приготовленной смесью за один прием. При необходимости штыкуют стеклянной палочкой и тщательно снимают излишки теста с конуса и со стекла;
- 3) После заполнения мини-конуса его сразу, но плавно (со скоростью 1 см/мин) поднимают вертикально вверх;
- 4) После полного растекания цементного теста под собственным весом измеряют диаметр его расплыва (P , мм) в трех направлениях и вычисляют среднеарифметическое значение.

normal consistency of the cement paste is considered to be such a consistency that the pestle of the Vicat device, when immersed in a ring filled with cement paste, does not reach the plate on which the ring is installed by (6 ± 1) mm. The amount of water (in mass % of cement) is considered the normal consistency of cement (NC, %).

The assessment of the mobility of cement paste and the influence of the specific surface area and SP content on it was carried out using a mini-cone (Fig. 1), similar to the mini-cone for determining the plasticizing capacity of the superplasticizer S-3 [28]. The mini-cone is a truncated cone with an upper diameter of 20 mm and a lower diameter of 40 mm, a height of 60 mm according to the following method (Fig. 2):

- 1) 100 g of binder are mixed with 35 g of water ($W/C=0.35$) and thoroughly mixed for 1 min;
- 2) the mini-cone is placed on a glass plate (all working surfaces must be equally moistened) and filled with the prepared mixture in one go. If necessary, it is tapped with a glass rod and excess dough is carefully removed from the cone and the glass;
- 3) After filling the mini-cone, it is immediately but smoothly (at a speed of 1 cm/min) lifted vertically upwards;
- 4) After the cement paste has completely spread under its own weight, the diameter of its spread (S , mm) is measured in three directions and the arithmetic mean value is calculated.

РИСУНОК 1

МИНИ-КОНУС

Figure 1

Mini-cone

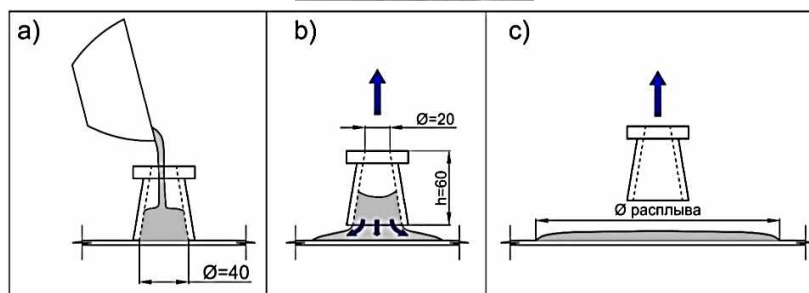


РИСУНОК 2

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА РАСПЛЫВА СМЕСИ ПО МИНИ-КОНУСУ

Figure 2

Scheme of measuring the diameter of the mixture spread using a mini-cone



Сравнивали прочность цементного камня двух промышленных цементов ЦЕМ I 42,5Н, ЦЕМ 0 52,5Н с прочностью ЦНВ-100, полученных на их основе. Образцы изготавливались из цементного теста с В/Ц отношением, равным нормальной густоте, в шестигнездных стальных формах с размерами $2 \times 2 \times 2$ см. Твердение образцов проводилось в камере нормального твердения (КНТ) в течение 1 сут при влажности $\geq 95\%$ и температуре $22(\pm 1)$ °С. После этого образцы расформовывали, шесть штук из которых сразу же испытывали на сжатие. Испытания проводились на машине испытательной

The strength of the cement stone of two industrial cements CEM I 42.5N, CEM 0 52.5N was compared with the strength of LWDC-100 obtained on their basis. The samples were made from cement paste with a W/C ratio equal to normal consistency, in six-cavity steel molds with dimensions of $2 \times 2 \times 2$ cm. The hardening of the samples was carried out in a normal hardening chamber (NHC) for 1 day at a humidity of $\geq 95\%$ and a temperature of $22 (\pm 1)$ °C. After that, the samples were unmolded, six pieces of which were immediately tested for compression. The tests were carried out on

разрывной Р-5 и на прессе МС-500, с максимальными показателями нагрузки 5 т и 50 т, соответственно. Остальные образцы выдерживались в КНТ перед испытанием на сжатие в течение 3, 7 и 28 сут по шесть образцов.

Активность цемента определяли согласно методике ГОСТ 310.4-81 (ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии). Испытания ЦНВ-100 проводили согласно ПНСТ 974-2024 (ПНСТ 974-2024 «Цементы низкой водопотребности. Технические условия»). В качестве заполнителя применяли монофракционный песок по ГОСТ 6139-2020 (ГОСТ 6139-2020 Песок для испытаний цемента. Технические условия).

Эксперименты и обсуждение результатов

Как было отмечено выше, эффект снижения водопотребности цемента при его совместном помоле с суперпластификатором оценивается по НГ и В/Ц, снижение которых до минимального значения позволит достичь максимальной прочности цементного камня и раствора на его основе – активности цемента по ГОСТ 310.4-81.

Безусловный интерес представляет концентрационная зависимость НГ от содержания «ПК-R» в ЦНВ-100 разной удельной поверхности ($S_{уд}$) на основе портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н. Результаты (рис. 3) разделены на два графика: составы с сухим «ПК-R» (рис. 3, а) и его водными растворами (рис. 3, б). Как видно из кривых рис. 3, нормальная густота возрастает с увеличением $S_{уд}$ и нелинейно снижается с увеличением содержания СП, то есть «эффект низкой водопотребности» возрастает в интервале 0,5-1,5% сухого СП и 0,5-1% водного раствора «ПК-R». Далее НГ имеет тенденцию к росту.

РИСУНОК 3

Концентрационные зависимости нормальной густоты ЦНВ-100 разной удельной поверхности от содержания суперпластификатора «ПК-R»:

- а) – сухой порошок «ПК-R»;
б) – водный раствор «ПК-R»

Figure 3

Concentration dependences of the normal consistency of LWDC-100 with different specific surface area on the content of superplasticizer "PC-R":

- а) - dry powder "PC-R";
б) - aqueous solution of "PC-R"

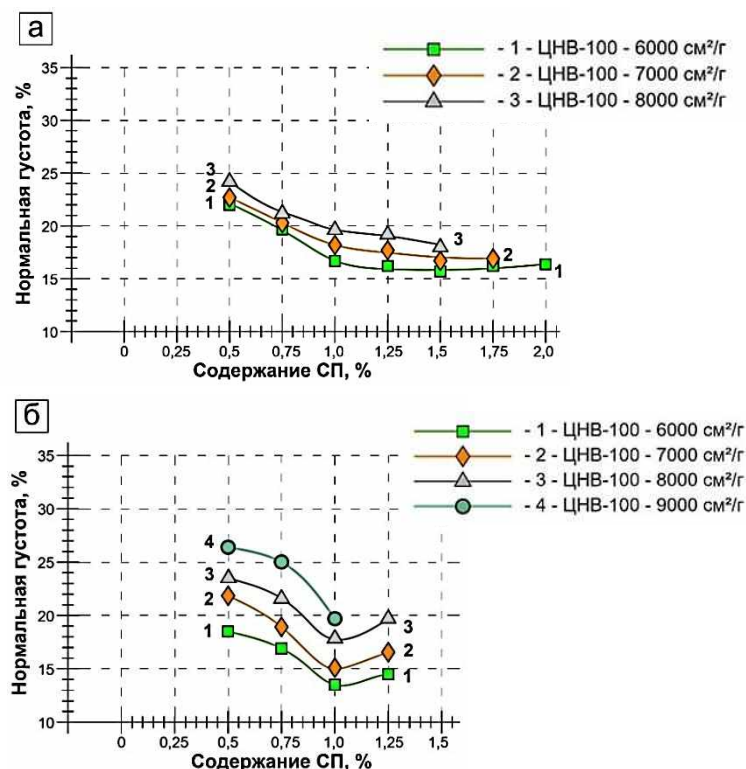
a R-5 tensile testing machine and an MS-500 press, with maximum load ratings of 5 t and 50 t, respectively. The remaining samples were kept in the KNT before compression testing for 3, 7 and 28 days, six samples each.

The activity of cements was determined according to the GOST 310.4-81 (GOST 310.4-81 Cements. Methods for determining the ultimate strength in bending and compression) (In Russian) method. The tests of LWDC-100 were carried out according to PNST 974-2024 (PNST 974-2024 "Low-water-demand cements. Technical conditions") (In Russian). Monofractional sand according to GOST 6139-2020 (GOST 6139-2020 Sand for cement testing. Specifications) (In Russian) was used as a filler.

Experiments and discussion

As noted above, the effect of reducing the water demand of cement when milled together with a superplasticizer is estimated by NC and W/C, the reduction of which to a minimum value will allow achieving the maximum strength of the cement stone and mortar based on it - cement activity according to GOST 310.4-81.

Of undoubted interest is the concentration dependence of NC on the content of "PC-R" in LWDC-100 of different specific surfaces (S_{sa}) based on Portland cement CEM I 42.5N. The results (Fig. 3) are divided into two graphs: compositions with dry "PC-R" (Fig. 3, a) and its aqueous solutions (Fig. 3, b). As can be seen from the curves in Fig. 3, the normal consistency increases with increasing S_{sa} and nonlinearly decreases with increasing SP content, that is, the "low water demand effect" increases in the range of 0.5-1.5% dry SP and 0.5-1% aqueous solution of "PC-R". Further, NC has a tendency to grow.



В составах ЦНВ-100 с сухим «ПК-R» (от 0,5% до 1,5%) НГ снижается с увеличением его концентрации

In the LWDC-100 compositions with dry "PC-R" (from 0.5% to 1.5%), NC decreases with increasing its

(кривые 1, 2, 3 – рис. 3, а), достигая наименьших значений 15,6-18,0% при 1,5% «ПК-R» в интервале удельной поверхности ЦНВ-100 от 6000 до 8000 $\text{см}^2/\text{г}$.

В образцах ЦНВ-100, полученных с водным раствором «ПК-R» во всем интервале $S_{\text{уд}}$ от 6000 до 9000 $\text{см}^2/\text{г}$ все четыре кривые имеют минимумы при 1%-ом содержании «ПК-R» (рис. 3, б). При $S_{\text{уд}}$ 6000-8000 $\text{см}^2/\text{г}$ и концентрации СП 1% величины НГ меньше (13,5-15%), чем у ЦНВ-100 с сухим «ПК-R». Нормальная густота ЦНВ-100 с водным раствором СП при $S_{\text{уд}}=9000 \text{ см}^2/\text{г}$ закономерно больше (при 0,5% СП равна 27%), однако при 1% «ПК-R» она снижается до 20%.

Далее было оценено изменение подвижности ЦТ по распылу мини-конуса. Предварительно было установлено, что распыл стандартного ЦЕМ I 42,5 Н при В/Ц=0,35 низкий – всего 40 мм, т.е. равен нижнему диаметру усеченного конуса, что свидетельствует о потере подвижности ЦТ и некорректности применения этого метода оценки при достижении определенного предела. Однако, при введении в воду затворения СП в количестве 0,5% от массы цемента, подвижность цементного теста резко возрастает (распыл до 220 мм), и метод мини-конуса становится пригодным для определения подвижности ЦНВ-100.

Обобщенные зависимости распыла ЦТ из ЦНВ-100 от содержания СП, который применялся в виде сухого порошка и водного раствора, представлены кривыми на рис. 4 (а, б).

РИСУНОК 4

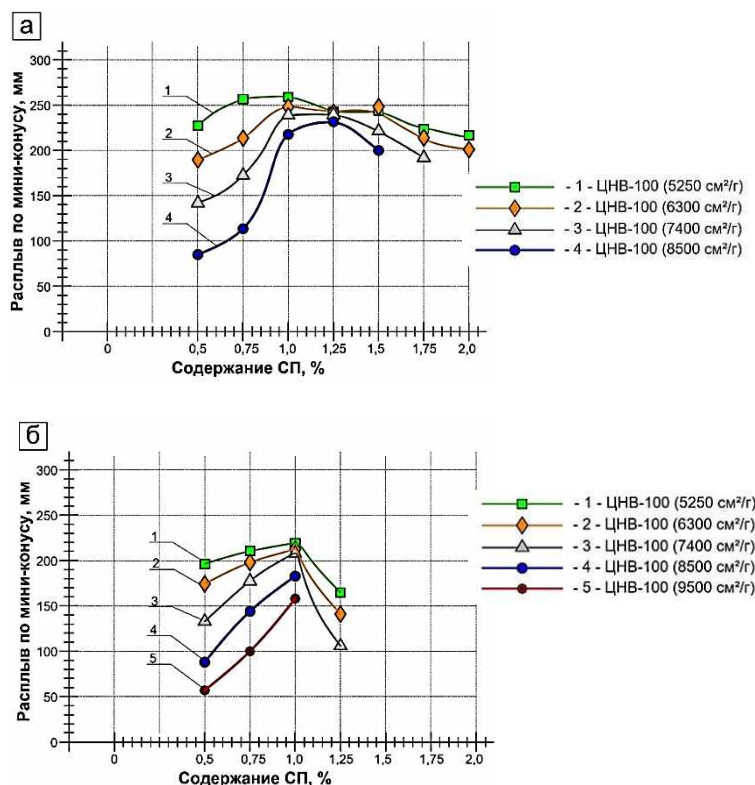
Концентрационные зависимости распыла по мини-конусу ЦНВ-100 разной удельной поверхности от содержания суперпластификатора «ПК-R»:

- а) – сухой порошок «ПК-R»;
б) – водный раствор «ПК-R»

Figure 4

Concentration dependences of the spread on the mini-cone of LWDC-100 of different specific surface on the content of superplasticizer "PC-R":

- а) - dry powder "PC-R";
б) - aqueous solution of "PC-R"



Из полученных кривых распыла следует, что наибольшее влияние на подвижность ЦТ в обоих вариантах применения «ПК-R» оказывает удельная поверхность цемента при малом содержании СП, равном 0,5% от массы цемента. С увеличением доли сухого СП до 1,25% эта разница нивелируется и распыл становится равным 230-240 мм при всех значениях $S_{\text{уд}}$ (рис. 4, а).

concentration (curves 1, 2, 3 - Fig. 3, a), reaching the lowest values of 15.6-18.0% at 1.5% "PC-R" in the range of specific surface of LWDC-100 from 6000 to 8000 $\text{см}^2/\text{г}$.

In the LWDC-100 samples obtained with an aqueous solution of "PC-R" in the entire range of S_{sa} from 6000 to 9000 $\text{см}^2/\text{г}$, all four curves have minima at 1% content of "PC-R" (Fig. 3, b). At S_{sa} 6000-8000 $\text{см}^2/\text{г}$ and a concentration of SP of 1%, the NC values are less (13.5-15%) than in LWDC-100 with dry "PC-R". The normal consistency of LWDC-100 with an aqueous solution of SP at $S_{\text{sa}}=9000 \text{ см}^2/\text{г}$ is naturally higher (at 0.5% SP is 27%), but at 1% "PC-R" it decreases to 20%.

Then the change in the mobility of the cement paste was estimated by the spread of the mini-cone. It was previously established that the spread of the standard CEM I 42.5 N at W/C=0.35 is low - only 40 mm, i.e. equal to the lower diameter of the truncated cone, which indicates a loss of mobility of the cement paste and the incorrectness of using this evaluation method when a certain limit is reached. However, when SP is introduced into the mixing water in an amount of 0.5% of the cement mass, the mobility of the cement paste increases sharply (spread up to 220 mm), and the mini-cone method becomes suitable for determining the mobility of LWDC-100.

The generalized dependences of the spread of the cement from LWDC-100 on the content of SP, which was used in the form of dry powder and aqueous solution, are presented by the curves in Fig. 4 (a, b).

From the obtained spread curves it follows that the greatest influence on the mobility of the cement in both variants of using "PC-R" is exerted by the specific surface of the cement at a low content of SP, equal to 0.5% of the cement mass. With an increase in the proportion of dry SP to 1.25%, this difference is leveled out and the spread becomes equal to 230-240 mm for all values of S_{sa} (Fig. 4, a). Then, at 1.5%

Далее, при 1,5% и более кривые «расходятся» с последующим незначительным снижением расплыва до 190-215 мм. Содержание сухого порошка «ПК-R», равное 1-1,25% от массы цемента, можно принять как оптимальное для обеспечения высокой подвижности ЦТ в интервале $S_{уд}=5250-8500 \text{ см}^2/\text{г}$.

В случае водных растворов «ПК-R» при получении ЦНВ-100 с $S_{уд}$ от 5250 до 9500 $\text{см}^2/\text{г}$ (рис. 4, б) наблюдаются наименьшие показатели расплыва ЦТ при 0,5% «ПК-R», но наибольшие достигаются при 1% «ПК-R» для всех значений $S_{уд}$. Однако при 1,25% происходит резкое снижение расплывов. В целом, при равных значениях удельной поверхности, расплывы ЦНВ-100, полученных с водными растворами «ПК-R», оказались ниже, чем с сухим «ПК-R».

Ранее нами было установлено [27], что при получении ЦНВ-100 исходный цемент с добавками водных растворов СП имеет лучшую размолоспособность, чем с сухим «ПК-R», что также позволяет достигать наибольшего содержания тонкой фракции до 30 мкм. Поэтому, для оценки прочности цементного камня (ЦК) был выбран состав, имеющий наименьшие показатели по нормальной густоте и при этом лучшую подвижность по расплыву мини-конуса. Этому соответствует ЦНВ-100 с 1% «ПК-R» в виде 50%-го водного раствора.

В качестве контрольных были взяты ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ 0 52,5Н без СП, которые отмечены на графиках прочности цементного камня на сжатие (рис. 5, а, б) в виде отдельных точек при $S_{уд}=3600-3650 \text{ см}^2/\text{г}$.

РИСУНОК 5

Прочность цементного камня ЦНВ-100 с 1% «ПК-R»

(50% водный р-р) на основе:

а) – ЦЕМ I 42,5Н;

б) – ЦЕМ 0 52,5Н

Figure 5

Strength of cement stone LWDC-100 with 1% "PC-R"

(50% aqueous solution) based on:

a) - CEM I 42.5N;

b) - CEM 0 52.5N

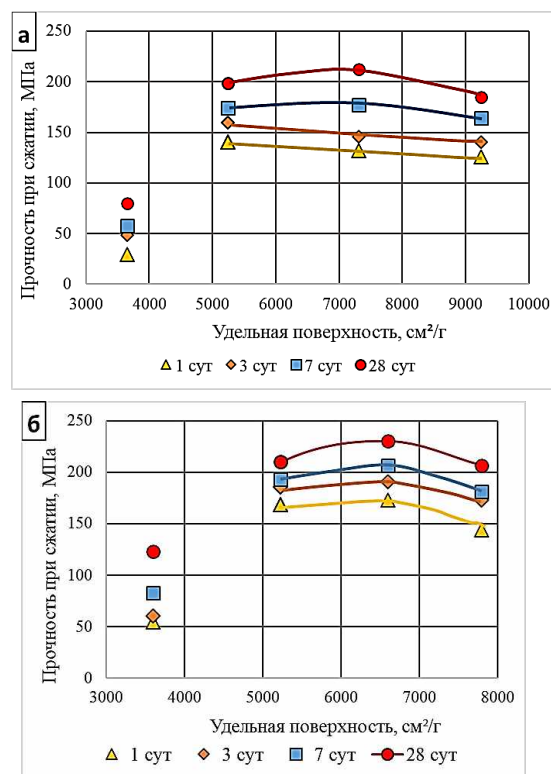
Ввиду низкой водопотребности и высокой дисперсности, составы ЦНВ-100 уже на 1 сутки имеют более высокую прочность цементного камня (на 50-70%), чем 28-суточная у исходных цементов. ЦНВ-100 на основе ЦЕМ I 42,5Н имеет максимальную прочность ЦК, равную 212 МПа при удельной поверхности 7300 $\text{см}^2/\text{г}$ (рис. 5, а), а

and more, the curves "diverge" with a subsequent insignificant decrease in the spread to 190-215 mm. The content of dry powder "PC-R", equal to 1-1.25% of the cement mass, can be accepted as optimal for ensuring high mobility of the cement mixture in the range of $S_{sa}=5250-8500 \text{ cm}^2/\text{g}$.

In the case of aqueous solutions of "PC-R" when obtaining LWDC-100 with S_{sa} from 5250 to 9500 cm^2/g (Fig. 4, b), the lowest values of CT spread are observed at 0.5% "PC-R", but the highest are achieved at 1% "PC-R" for all values of S_{sa} . However, at 1.25%, a sharp decrease in spreads occurs. In general, with equal values of the specific surface, the spreads of LWDC-100 obtained with aqueous solutions of "PC-R" turned out to be lower than with dry "PC-R".

We have previously established [24] that when obtaining LWDC-100, the original cement with additives of aqueous solutions of SP has better grindability than with dry "PC-R", which also makes it possible to achieve the highest content of the fine fraction up to 30 μm . Therefore, to assess the strength of the cement stone (CS), a composition was selected that had the lowest indicators for normal consistency and at the same time the best mobility for the mini-cone spread. This corresponds to LWDC-100 with 1% "PC-R" in the form of a 50% aqueous solution.

CEM I 42.5N and CEM 0 52.5N without SP were taken as controls, which are marked on the graphs of the compressive strength of the cement stone (Fig. 5, a, b) as separate points at $S_{sa}=3600-3650 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Due to low water demand and high dispersion, the LWDC-100 compositions have a higher cement stone strength (by 50-70%) already after 1 day than the 28-day strength of the original cements. LWDC-100 based on CEM I 42.5N has a maximum CS strength of 212 MPa with a specific surface area of 7300 cm^2/g (Fig. 5, a), and LWDC-

ЦНВ-100 на основе ЦЕМ 0 52,5Н – 231 МПа при удельной поверхности 6600 см²/г (рис. 5, б). Дальнейшее повышение удельной поверхности не приводит к увеличению прочности, вследствие повышенной водопотребности (рис. 3).

Далее представлены результаты определения водопотребности цементно-песчаного раствора (ЦПР) и активности исходных цементов и ЦНВ-100 с 1% ПК-Р (50% водный р-р) на их основе. Образцы были изготовлены при одинаковой консистенции ЦПР, определенной по стандартной методике ГОСТ 310.4-81, с тем отличием, что, согласно ПНСТ 974-2024, для ЦНВ-100 расплыв конуса ЦПР должен составлять (120±5) мм. Было определено, что водоцементное отношение для достижения стандартной консистенции раствора для исходных цементов ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ 0 52,5Н составляет 0,44 и 0,45, соответственно. Как видно на графиках рис. 6 (а, б) В/Ц и НГ составов ЦНВ-100 в широком диапазоне $S_{уд}$ имеют меньшие показатели водопотребности (до 2-х раз), чем исходные цементы.

РИСУНОК 6

Сравнение водопотребности ЦНВ-100 с 1% «ПК-Р» (50% водный р-р) на основе:

- а) – ЦЕМ I 42,5Н;
б) – ЦЕМ 0 52,5Н

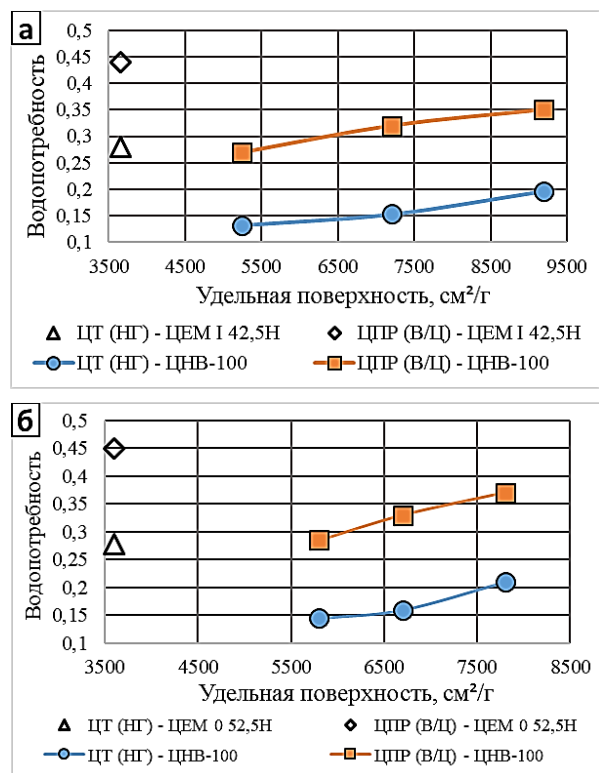
Figure 6

Comparison of water demand of LWDC-100 with 1% "PC-R" (50% water solution) based on:

- а) - CEM I 42.5N;
б) - CEM 0 52.5N

100 based on CEM 0 52.5N - 231 MPa with a specific surface area of 6600 cm²/g (Fig. 5, b). A further increase in the specific surface does not lead to an increase in strength, due to increased water demand (Fig. 3).

The results of determining the water demand of the cement-sand mortar (CSM) and the activity of the original cements and LWDC-100 with 1% PC-R (50% aqueous solution) based on them are presented below. The samples were made with the same consistency of the cement-reinforced concrete determined using the standard method of GOST 310.4-81, with the difference that, according to PNST 974-2024, the cone spread of the cement-reinforced concrete for CNV-100 should be (120±5) mm. It was determined that the water-cement ratio for achieving the standard consistency of the solution for the original cements CEM I 42.5N and CEM 0 52.5N is 0.44 and 0.45, respectively. As can be seen from the graphs in Fig. 6 (a, b), the W/C and NC ratios of the LWDC-100 compositions in a wide range of S_{sa} have lower water demand values (up to 2 times) than the original cements.



На графиках рис. 7 видно, что ЦНВ-100 обладают высокой активностью уже в ранние сроки твердения: так, уже на 2 сут составы ЦНВ-100 по активности превосходят исходные цементы 28-суточной прочности. Наибольшая активность достигается при тех же значениях удельной поверхности ЦНВ-100, как и с прочностью ЦК. При этом максимальная активность ЦНВ-100 на ЦЕМ I 42,5Н составляет 93 МПа (рис. 7, а), а ЦНВ-100 на ЦЕМ 0 52,5Н составляет 112 МПа (рис. 7, б). Показатели прочности при изгибе соответствуют тем же максимумам относительно удельной поверхности. В соответствии с требованиями ПНСТ 974-2024, это позволяет их отнести к ЦНВ-100 с классом по прочности 92,5 и выше. Высокая активность и низкая водопотребность полученного состава ЦНВ-100 с 1% «ПК-Р» (в виде 50%-го

The graphs in Fig. 7 show that LWDC-100 exhibit high activity already in the early stages of hardening: thus, already on the 2nd day, LWDC-100 compositions surpass the original cements of 28-day strength in activity. The highest activity is achieved at the same values of the specific surface of LWDC-100, as with the strength of the CS. At the same time, the maximum activity of LWDC-100 on CEM I 42.5N is 93 MPa (Fig. 7, a), and LWDC-100 on CEM 0 52.5N is 112 MPa (Fig. 7, b). The bending strength indicators correspond to the same maxima relative to the specific surface. In accordance with the requirements of PNST 974-2024, this allows them to be classified as LWDC-100 with a strength class of 92.5 and higher. The high activity and low water demand of the obtained composition LWDC-100 with 1% "PC-R" (in the form of a 50% aqueous solution) will allow it to

водного раствора) позволит применять его для получения высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов.

be used to produce high-strength and ultra-high-strength concrete.

РИСУНОК 7

Активность ЦНВ-100 с 1% «ПК-R» (50% водный р-р). Пределы прочности ЦПР при сжатии и изгибе составов на основе:

а), в) – ЦЕМ I 42,5Н;

б), г) – ЦЕМ 0 52,5Н

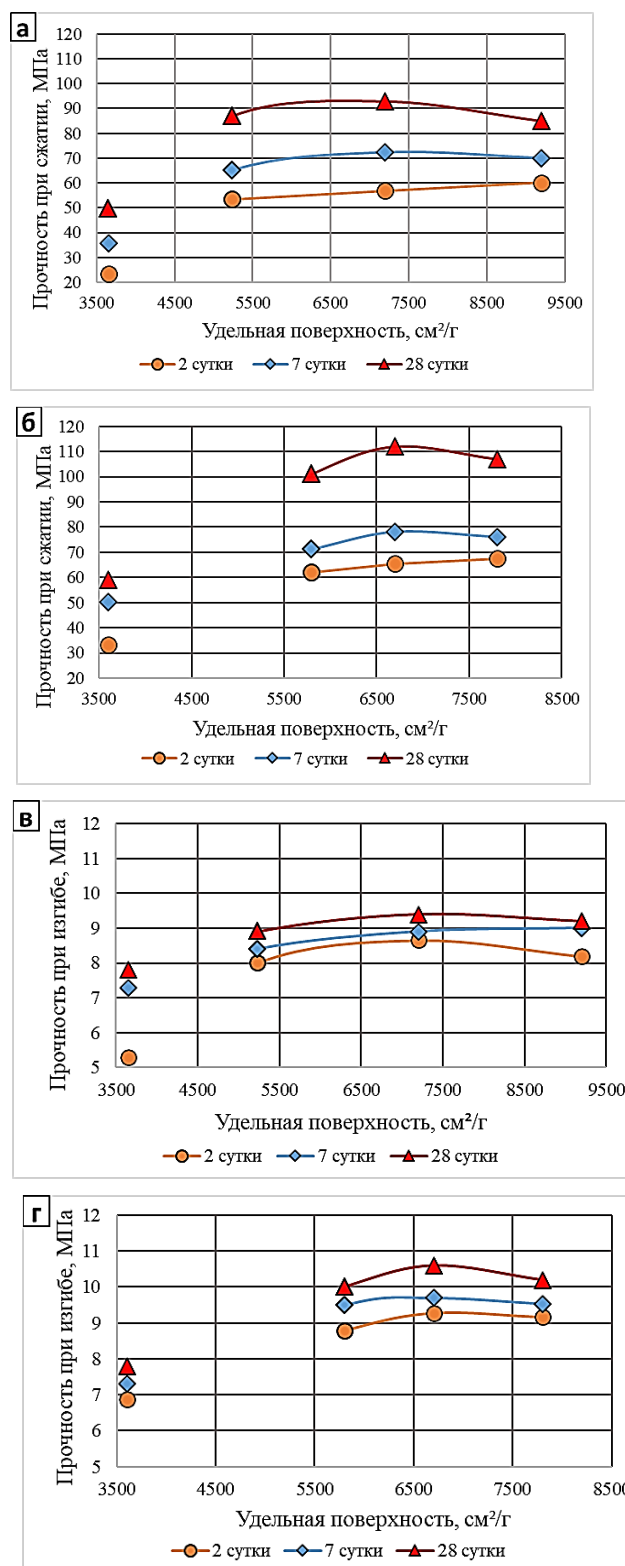
Figure 7

Activity of LWDC-100 with 1% "PC-R" (50% aqueous solution).

Limits of strength of CSM in compression and bending of compositions based on:

а), с) - CEM I 42.5N;

б), д) - CEM 0 52.5N



Заключение

По результатам выполненных исследований можно заключить следующие выводы:

- Форма суперпластификатора «Полипласт ПК» (тип R) (порошок или водный раствор) при получении ЦНВ-100 оказывает влияние на нормальную густоту и подвижность

Conclusions

Based on the results of the studies, the following conclusions can be made:

- The form of the superplasticizer "Polyplast PC" (type R) (powder or aqueous solution) when obtaining LWDC-100 affects the normal consistency and mobility

цементного теста, оцениваемую по распылу мини-конуса. Так наименьшая НГ ЦНВ-100 достигается с 50%-ым водным раствором суперпластификатора «Полипласт ПК» (тип R) при его 1%-ом содержании от массы цемента. Распыл цементного теста ЦНВ-100, полученных с водными растворами «ПК-R» при всех значениях удельной поверхности, ниже, чем распыл ЦНВ-100, полученных с сухим порошком «ПК-R».

- Оптимальным по нормальной густоте и подвижности выбран состав ЦНВ-100 с 1% «ПК-R» (в виде 50%-го водного раствора), у которого максимальная прочность цементного камня на 28 суток равна 212 МПа (на основе ЦЕМ I 42,5Н) и 231 МПа (на основе ЦЕМ 0 52,5Н) при удельной поверхности 7300 см²/г и 6600 см²/г, соответственно.

- Максимально достигнутая активность (прочность ЦПР на монофракционном песке) ЦНВ-100 составляет 93 МПа (ЦНВ-100 – 7300 см²/г на основе ЦЕМ I 42,5Н) и 112 МПа (ЦНВ-100 – 6600 см²/г на основе ЦЕМ 0 52,5Н), что соответствует классу по прочности 92,5 и выше. Это позволит подбирать составы высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов на основе этих вяжущих.

of the cement paste, assessed by the mini-cone spread. Thus, the lowest NC of LWDC-100 is achieved with a 50% aqueous solution of the superplasticizer "Polyplast PC" (type R) at its 1% content of the cement mass. The spread of the cement paste LWDC-100, obtained with aqueous solutions of "PC-R" at all values of the specific surface, is lower than the spread of LWDC-100, obtained with dry powder "PC-R".

- The optimal composition in terms of normal consistency and mobility was selected to be LWDC-100 with 1% "PC-R" (in the form of a 50% aqueous solution), which has a maximum strength of cement stone on the 28th day of 212 MPa (based on CEM I 42.5N) and 231 MPa (based on CEM 0 52.5N) with a specific surface area of 7300 cm²/g and 6600 cm²/g, respectively.

- The maximum achieved activity (strength of CSM on monofraction sand) of LWDC-100 is 93 MPa (LWDC-100 - 7300 cm²/g based on CEM I 42.5N) and 112 MPa (LWDC-100 - 6600 cm²/g based on CEM 0 52.5N), which corresponds to strength class 92.5 and higher. This will make it possible to select compositions of high-strength and ultra-high-strength concrete based on these binders.

Литература:

1. Horst G., Joerg R. Self-compacting concrete – another stage in the development of the 5-component system of concrete // *Betontechnische Berichte (Concrete Technology Reports)*, Verein Deutscher Zementwerke. Dusseldorf. – 2001. – Pp. 39–48.
2. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // *Строительные материалы*. – 2016. № 1-2. – С. 96-103. EDN VPWHMH.
3. Divahar Ravi, K. Naveen Kumar, Sangeetha S.P (2024). Characterization and Development of High-Strength and High-Performance Concrete Incorporating Mineral and Chemical Admixtures - A Review // *E3S Web of Conferences*. 596. – 2024. – P. 12. DOI: 10.1051/e3sconf/202459601014
4. Wang D., Shi C., Wu L. Research and Applications of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in China [J] // *Bull. Chinese Cer Amic Soc.* – 2016. – № 35(1). – Pp. 141–149.
5. Marvila M.T., de Azevedo A.R.G., de Matos P.R., Monteiro S.N., Vieira C.M.F. Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials // *Materials*. – 2021. – №14, 4304. – P. 36. DOI: 10.3390/ma14154304.
6. Чаттерджи А. К. Сверхвысококачественный бетон: переход от исследований к применению // *Цемент и его применение*. – 2023. – № 3. – С. 22-26. EDN TXGZVJ.
7. ElHawary Y., Hamdy M., Haroun J., Youssef O., Breakah T., Nagib M. Producing 100+ MPa Field Concrete in Developing Countries: Requirements and Challenges // *Journal of Building Materials and Structures*. – 2024. – №11 (2). – Pp. 158-167. DOI: 10.34118/jbms.v11i2.4083.
8. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с. ил.
9. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р. Минеральные вяжущие вещества и экология // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : Сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук*. – Том 2. – М.: Издательство АСВ, 2022. – С. 364-367. EDN BYBGGY.

References:

1. Horst G., Joerg R. Self-compacting concrete – another stage in the development of the 5-component system of concrete // *Betontechnische Berichte (Concrete Technology Reports)*, Verein Deutscher Zementwerke. Dusseldorf – 2001. – Pp. 39–48.
2. Kalashnikov V.A. Evolution of development of concretes compositions and change in concrete strength. Concretes of present and future part 1. Change in compositions and strength of concretes // *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. – 2016. № 1-2. – С. 96-103. EDN VPWHMH (in Russian).
3. Divahar Ravi, K. Naveen Kumar, Sangeetha S.P (2024). Characterization and Development of High-Strength and High-Performance Concrete Incorporating Mineral and Chemical Admixtures - A Review // *E3S Web of Conferences*. 596. – 2024. – P. 12. DOI: 10.1051/e3sconf/202459601014
4. Wang D., Shi C., Wu L. Research and Applications of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in China [J] // *Bull. Chinese Cer Amic Soc.* – 2016. – № 35(1). – Pp. 141–149.
5. Marvila M.T., de Azevedo A.R.G., de Matos P.R., Monteiro S.N., Vieira C.M.F. Materials for Production of High and Ultra-High Performance Concrete: Review and Perspective of Possible Novel Materials // *Materials*. – 2021. – №14, 4304. – P. 36. DOI: 10.3390/ma14154304.
6. Chatterjee A. K. Ultra-high-performance concrete: moving from research to application // *Cement and its application*. – 2023. – № 3. – Pp. 22-26. EDN TXGZVJ (in Russian).
7. ElHawary Y., Hamdy M., Haroun J., Youssef O., Breakah T., Nagib M. Producing 100+ MPa Field Concrete in Developing Countries: Requirements and Challenges // *Journal of Building Materials and Structures*. – 2024. – №11 (2). – Pp. 158-167. DOI: 10.34118/jbms.v11i2.4083.
8. Akhverdov I. N. Fundamentals of the Physics of Concrete. – Moscow: Stroyizdat, 1981. – 464 p. ill. (in Russian).
9. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Mineral binders and ecology // *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support of development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2021 : Collection of scientific works of RAASN*. – Vol. 2. – Moscow : Izdatelstvo ASV, 2022. – P. 364-367. EDN BYBGGY
10. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Influence of complex additives on the strength properties of composite portland cement

10. Ермилова Е. Ю., Камалова З. А. Влияние комплексных добавок на прочностные свойства композиционного портландцемента // *Строительные конструкции, здания и сооружения*. – 2024. – № 4(9). – С. 46-53. EDN LJTIWJ.
11. Рахимова Н. Р., Сабиров И. Р. Перспективы и возможности применения бентонитовых глин для получения низкоэмиссионных портландцементов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2023. – № 9(777). – С. 20-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-777-9-20-35. EDN WPIJBH.
12. Hansted F. A. S., Zuliani Mantegazini D., Ribeiro T., Cardoso Goncalves C., Balestieri J. A mini-review on the use of waste in the production of sustainable Portland cement composites // *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. – 2022. – № 41(4):0734242X2211352. – Pp. 828-838. DOI: 10.1177/0734242X221135246.
13. Токарский А. Я., Егоров В. Н., Ганзен Е. В., Кузьмина Т. К., Несветайло В. М. Высокопрочный цемент и его применение при возведении монолитных железобетонных конструкций // *Строительное производство*. – 2023. – № 1. – С. 60-64. DOI: 10.54950/26585340_2023_1_60. EDN PRYAFZ.
14. Хохряков О. В. Композиционные цементы низкой водопотребности. Возможности и перспективы применения в строительных материалах // *Строительные материалы*. – 2022. – № 1-2. – С. 123-133. DOI 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH.
15. Батраков В. Г., Башлыков Н. Ф., Бабаев Ш. Т., Сердюк В. Н., Фаликман В. Р., Несветайло В. М. Бетоны на вяжущих низкой водопотребности // *Бетон и железобетон*. – 1988. – № 11. – С. 4-6. EDN XYIQHJ.
16. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. – М.: *Издательство АСВ*, 2021. – 366 с. ISBN 978-5-4323-0405-6. EDN DYVENO.
17. Юдович Б. Э., Зубехин С. А., Фаликман В. Р., Башлыков Н. Ф. Цемент низкой водопотребности: новые результаты и перспективы // *Цемент и его применение*. – 2006. – № 4. – С. 81-85. EDN HUZJXF.
18. Юдович Б. Э., Зубехин С. А. Цементы с низкой водопотребностью и портландцемент с плотной контактной зоной // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. – 2010. – № 3(15). – С. 48-56. EDN OOGJZL.
19. Калашников В. И. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения // *BST: Бюллетень строительной техники*. – 2016. – № 12(988). – С. 48-52. EDN WZEXWN.
20. Калашников В. И., Тараканов О. В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // *Строительные материалы*. – 2017. – № 1-2. – С. 62-67. EDN XXHSZ.
21. Приходов Д. А., Баранов В. Н., Никифорова Э. М., Гильманшина Т. Р. Исследование влияния активирования портландцемента на физико-механические свойства бетона // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11-5. – С. 938-943. EDN XSDHIF.
22. Красовский П.С. Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов: учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – 204 с.: ил.
23. Anawkar Shraddha, Guptha DrK.G. Optimization of cement quantity through the engineering of particle size distribution – a sustainable approach // *Results in Materials*. – 2023. – № 19(12):100408. – P.10. DOI: 10.1016/j.rinma.2023.100408.
24. Kim D. Effect of Adjusting for Particle-Size Distribution of Cement on Strength Development of Concrete // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2018. – № 1-6. – P. 6. DOI 10.1155/2018/1763524.
25. Ehikhuemen S., Igba T., Busari A.O., Oyeibisi S.O. The influence of cement fineness on the structural characteristics of normal concrete // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2019. – № 640. – Pp. 12-43. DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012043
26. Yu Ch., Zhang Y., Li Z. Study on the particle size distribution characteristics and cementitious activity of different fineness components in cement // *IOP Conference Series: Earth and // Building structures, buildings and structures*. – 2024. – № 4(9). – Pp. 46-53. EDN LJTIWJ (in Russian).
11. Rakhimova N. R., Sabirov I. R. Prospects and possibilities of using bentonite clays for the production of low-emission portland cement // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. – 2023. – № 9(777). – Pp. 20-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-777-9-20-35. EDN WPIJBH (in Russian).
12. Hansted F. A. S., Zuliani Mantegazini D., Ribeiro T., Cardoso Goncalves C., Balestieri J. A mini-review on the use of waste in the production of sustainable Portland cement composites // *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. – 2022. – № 41(4):0734242X2211352. – Pp. 828-838. DOI: 10.1177/0734242X221135246.
13. Tokarskiy A. Ya., Egorov V. N., Ganzen E. V., Kuzmina T. K., Nesvetailo V. M. High-strength cement and its use in the construction of monolithic reinforced concrete structures // *Construction production*. – 2023. – № 1. – Pp. 60-64. DOI: 10.54950/26585340_2023_1_60. EDN PRYAFZ (in Russian).
14. Khokhryakov O. V. Composite cements of low water demand. Possibilities and prospects of application in building materials // *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. – 2022. – № 1-2. – Pp. 123-133. DOI 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH (in Russian).
15. Batrakov V. G., Bashlykov N. F., Babaev Sh. T., Serdyuk V. N., Falikman V. R. Concretes on binders with low water demand // *Concrete and reinforced concrete*. – 1988. – № 11. – Pp. 4-6. EDN XYIQHJ (in Russian).
16. Khozin V.G., Khokhryakov O. V. "Carbonate" low water demand cements. – Moscow : *Izdatelstvo ASV*, 2021. – 366 p. ISBN 978-5-4323-0405-6. EDN DYVENO (in Russian).
17. Yudovich B. E. Zubekhin S. A., Falikman V. R., Bashlykov N. F. Low water-demand cement: new results and prospects. *Cement and its application*. – 2006. – № 4. – Pp. 81-85. EDN HUZJXF (in Russian).
18. Yudovich B. E. Zubekhin S. A. Cement with a low water requirement and portland cement with a tight contact zone // *Alitinform: cement. Concrete. Dry mixtures*. – 2010. – № 3(15). – Pp. 48-56. EDN OOGJZL (in Russian).
19. Kalashnikov V. I. The concept of a strategic development of the activated concrete of new generation plasticized powder // *BST: byulleten' stroitel'noj tehniki*. – 2016. – № 12(988). – Pp. 48-52. EDN WZEXWN (in Russian).
20. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V. About the use of complex additives in concretes of a new generation // *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. – 2017. – № 1-2. – Pp. 62-67. EDN XXHSZ (in Russian).
21. Prikhodov D. A., Baranov V. N., Nikiforova E. M., Gilmanshina T. R. Study of influence at physical and mechanical properties at activating of portland cement // *Fundamental research*. – 2016. – № 11-5. – Pp. 938-943. EDN XSDHIF (in Russian).
22. Krasovsky P.S. Physicochemical bases of formation of structure of cement concretes: textbook. manual. – Khabarovsk: *Publishing house of Far Eastern State Transport University*, 2013. – 204 p.: ill. (in Russian).
23. Anawkar Shraddha, Guptha DrK.G. Optimization of cement quantity through the engineering of particle size distribution – a sustainable approach // *Results in Materials*. – 2023. – № 19(12):100408. – P.10. DOI: 10.1016/j.rinma.2023.100408.
24. Kim D. Effect of Adjusting for Particle-Size Distribution of Cement on Strength Development of Concrete // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2018. – № 1-6. – P. 6. DOI 10.1155/2018/1763524.
25. Ehikhuemen S., Igba T., Busari A.O., Oyeibisi S.O. The influence of cement fineness on the structural characteristics of normal concrete // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2019. – № 640. – Pp. 12-43. DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012043
26. Yu Ch., Zhang Y., Li Z. Study on the particle size distribution characteristics and cementitious activity of different fineness components in cement // *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science*. – 2021. – № 768(1):012095. – P. 5. DOI: 10.1088/1755-1315/768/1/012095.
27. Гуляков Е. Г., Хозин В. Г., Боровских И. В., Ганеева Ю. М. Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2024. – № 2(68). – С. 77-91. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7. EDN GINAGZ.
28. Хохряков О. В., Хаматова А. Р. Оценка эффективности добавки на основе цемента низкой водопотребности для портландцемента // *Вестник Технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 113-115. EDN ULRPFB.
29. Гаркави М. С., Артамонов А. В., Колодежная Е. В., Пуршева А. В., Ахметзянова М. А., Худовекова Е. А. Цементы низкой водопотребности центробежно-ударного помола // *Строительные материалы*. – 2019. – № 1-2. – С. 23-27. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. EDN YYFQXB.
30. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Низамов Р. К., Кашапов Р. Р., Баишев Д. И. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2018. – № 1. – С. 53-57. EDN YLSUVN.
- fineness components in cement // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – № 768(1):012095. – P. 5. DOI: 10.1088/1755-1315/768/1/012095.
27. Gulyakov E. G., Khozin V. G., Borovskikh I. V., Ganeeva Y. M. The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water demand cements // *News KSUAE*. – 2024. – № 2(68). – Pp. 77-91. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7. EDN: GINAGZ (in Russian).
28. Khokhryakov O. V., Khamatova A. R. Evaluation of the efficiency of low water demand cement based additive for Portland cement // *Herald of Technological University*. – 2015. – Vol. 18, № 15. – Pp. 113-115. EDN ULRPFB (in Russian).
29. Garkavi M. S., Artamonov A. V., Kolodezhnaya E. V., Pursheva A. V., Akhmetzyanova M. A., Khudovekova E. A. Low Water Requirement Cements of Centrifugal Impact Grinding // *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. – 2019. – № 1-2. – Pp. 23-27. DOI 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. EDN YYFQXB (in Russian).
30. Khozin V. G., Khohryakov O. V., Nizamov R. K., Kashapov R. R., Baishev D. I. Experience in nano-modification of low water demand cements // *Industrial and civil engineering*. – 2018. – № 1. – Pp. 53-57. EDN YLSUVN (in Russian).

Гуляков Евгений Геннадьевич – аспирант, инженер, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КГАСУ), E-mail: gulyakoveg@kgasu.ru (автор для связи)

Хозин Вадим Григорьевич – заведующий кафедрой ТСМИК, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КГАСУ), E-mail: khozin.vadim@yandex.ru

Боровских Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КГАСУ), E-mail: borigor83@gmail.com

Зигангиров Адель Ильясович – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» (КГАСУ), E-mail: zigangirovadel@yandex.ru

Вклад авторов: Хозин В.Г. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Боровских И.В. – идея, научное руководство, обработка материала, написание статьи; Гуляков Е.Г., Зигангиров А.И. – разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Gulyakov Evgeny Gennadievich – post-graduate student, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), E-mail: gulyakoveg@kgasu.ru (author for contact)

Khazin Vadim Grigorievich – Head of the Department of TBMPs, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), E-mail: khazin.vadim@yandex.ru

Borovskikh Igor Viktorovich – candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), E-mail: borigor83@gmail.com

Zigangirov Adel Ilyasovich – student, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), E-mail: zigangirovadel@yandex.ru

Contribution of the author: Khozin V.G.- idea, scientific leadership, scientific editing of the article; Borovskikh I.V. – idea, scientific guidance, material processing, article writing; Gulyakov E.G., Zigangirov A.I. – development of methods, processing of material, writing an article.

The authors declare that there is no conflict of interest.