

DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393

UDC 691

Concrete with fillers of various dispersion and their nanomodification

Author:

Boris V. Gusev,

Head of the Department of Construction Materials and Technologies at Russian University of Transport,
Moscow, Russia, e-mail: info-rae@mail.ru

Abstract: The author is the first to propose the filling and nanostructuring of coarse materials such as concrete. Existing grinding methods in construction materials provide particle sizes of 10–50 microns (microns), including cement particles. It is preferable to use cavitation technology in suspensions when producing smaller particles.

The article discusses the nanostructuring of cement systems by introducing ultra- and nanodispersed mineral additives. At the same time, additional grinding of mineral additives is carried out at cavitation plants. Nanostructuring provides compaction of concrete structures and increase the strength characteristics of concrete up to 2.5 times.

Keywords: physical model, mineral aggregates, cavitation grinding, structure, nanostructuring, strength.

For citation: Gusev B.V. Concrete with fillers of various dispersion and their nanomodification // Nanotechnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 4, pp. 384–393. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393.

Machine-readable information on CC-licenses (HTML-code) in metadata of the paper

`
Concrete with fillers of various dispersion and their nanomodification by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="Nanotechnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 4, pp. 384–393. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393" property="cc:attributionName" rel="cc:attributionURL">Gusev B.V. is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2019/.
Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="info-rae@mail.ru" rel="cc:morePermissions">info-rae@mail.ru.`

The paper has been received by editors: 02.07.2019.

The paper has been received by editors after peer-review: 18.07.2019.

The paper has been accepted for publication: 04.08.2019.

Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация

Автор:

Гусев Борис Владимирович,

зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии» Московского университета транспорта,
Москва, Россия, e-mail: info-rae@mail.ru

Резюме: Автором впервые предлагается наполнение и наноструктурирование грубодисперсных материалов типа бетонов. Существующие методы измельчения в строительных материалах обеспечивают получение дисперсности частиц 10–50 мкм (микрон), в том числе и частиц цемента. Предпочтительно при получении более мелких частиц применять кавитационную технологию в суспензиях.

В статье рассматривается наноструктурирование цементных систем за счёт введения ультра- и нанодисперсных минеральных добавок. При этом дополнительное измельчение минеральных добавок выполняется на кавитационных установках. Наноструктурирование обеспечивает уплотнение бетонных структур и повышение прочностных показателей бетона до 2,5 раз.

Ключевые слова: физическая модель, минеральные наполнители, кавитационное измельчение, структура, наноструктурирование, прочность.

Для цитирования: Гусев Б.В. Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 384–393. – DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-384-393.

Машиночитаемая информация о CC-лицензиях (HTML-код) в метаданных статьи

`
Concrete with fillers of various dispersion and their nanomodification by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Gusev B.V is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-4-2019/.
Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="mailto:info-rae@mail.ru" rel="cc:morePermissions">info-rae@mail.ru.`

Статья поступила в редакцию: 02.07.2019.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 18.07.2019.

Статья принята к публикации: 04.08.2019.

INTRODUCTION

In Russia, ashes are widely used as mineral additives (fillers) for concrete mixtures. Table 1 presents the results of studies of the properties of concrete with the combined use of dump and dry ash in fine-grained concrete mixtures. These mineral additives have varying degrees of dispersion, differing by an order of magnitude.

It follows from Table 1 that the use of fillers of mineral additives of varying degrees of dispersion provides a reduction in cement consumption from 498 to 300 kg/m³ and the production of concrete of approximately the same strength R_{cr} (43.7 and 41.2 MPa) under the conditions of heat treatment of products after 1 day.

MAIN PART

Since the beginning of the 80s, the author began his work on the problem and features of nanostructured multi-tonnage materials. In this case, nanostructures do not cover the entire volume of materials, but form nanostructured layers in the total volume of the material. Therefore, we can expect to obtain additional structural bonds and increase the strength of bulk materials and increase technical properties by 2–2.5 times [1].

Natural molecular nanotechnology constructed systems in a “bottom-up” manner, which ensured the diversity of the world and the very existence of the highest form

of matter – living organisms. Artificial nanotechnology creates nanosystems both “bottom-up” and “top-down”. The phenomena of self-organization are already known, however, for this it is first necessary to obtain nanosized particles [1, 2].

Chemical and physical technologies, of course, are the main ones in the production of nanodispersed particles (dissolution and polycondensation processes, cryogenic technologies, plasma method, and many others) [3, 4, 5]. According to the degree of dispersion, it is proposed to classify ultrafine materials depending on the average grain size in nm as follows [4]:

- fine materials – 10⁴–10³ nm (10⁻¹ microns);
- ultrafine materials – 10³–10² nm (1–10⁻¹ microns);
- nanomaterials – less than 10² nm (<10⁻¹ microns).

From the point of view of productivity and cost of production of large-tonnage materials, a special role is devoted to the methods of mechanical and mechanochemical grinding, which on an industrial scale make it possible to obtain fine particles.

The Scientific and Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZhB) of the Gosstroy of the USSR, under the guidance of the author, has been studying the features of using activation modes using vibration-pulse modes since the 1980s. Rotary pulsation apparatus (RPA) were the primary equipment, widely used in various sectors of the economy for emulsions and suspensions. In the working chamber of the

Table 1

The introduction of mineral additives in the form of ash and microsilica in the composition of sand concrete

№	Actual concrete composition, m (mass)*								Rigidity sec.	Bulk density, kg/m ³	Water cement ratio, W/C	Compressive strength R _{Compress} , 1 day MPa
	m _c , kg/m ³	m _s , kg/m ³	m _a , kg/m ³	m _m , kg/m ³	m _m , %	m _{S-3} , kg/m ³	m _{S-3} , %	m _w , kg/m ³				
1	567	1120	332					225	40	2191	0,40	45,9
2	498	1285	300					197	40	2250	0,39	43,7
3	380	1458	248					156	40	2205	0,41	30,6
4	485	1063	315	54,6	10	5,46	1	176	40	2010	0,36	56,0
5	443	1269	298	49,5	10	5,05	1	179	40	2200	0,40	48,0
6	315	1347	229	38,0	10	3,88	1	164	20	2040	0,52	34,0
7	460	1135	336	115,0	20	11,50	2	196	40	2225	0,43	64,2
8	412	1328	314	103,0	20	10,50	2	196	40	2320	0,48	58,2
9	300	1432	244	74,8	20	7,48	2	144	40	2166	0,48	41,2
10	408	1151	341	174,5	30	17,40	3	214	40	2274	0,52	65,3
11	315	1164	271	135,0	30	13,50	3	147		2030	0,46	
12	270	1487	253	116,0	30	11,60	3	158	40	2260	0,59	55,7

* m_c – mass of concrete, m_s – mass of sand, m_a – mass of ashes, m_m – mass of microsilica, m_{S-3} – the amount of S-3 superplasticizers, m_w – mass of water.

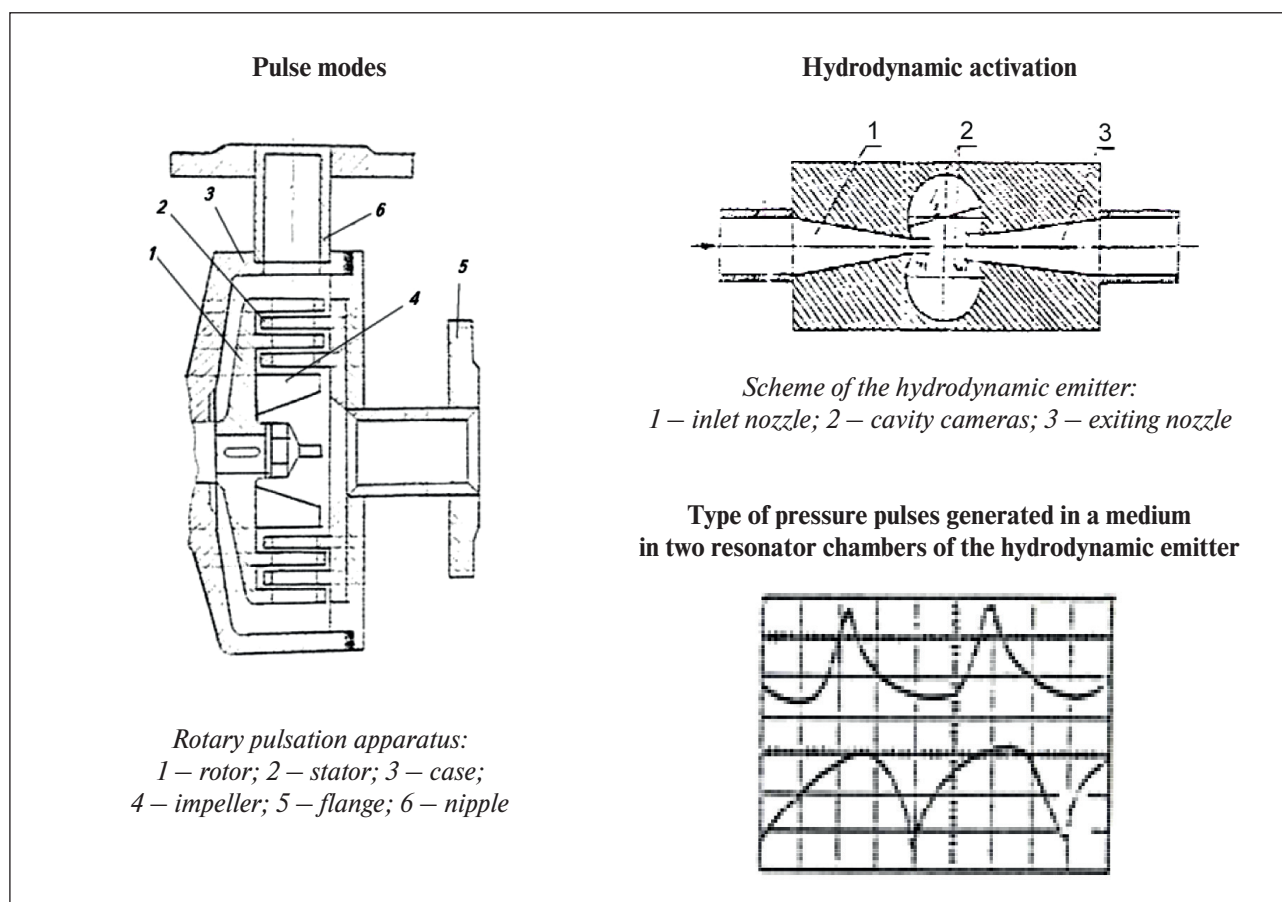


Fig. 1. Wave activation processes

pump, which consists of a fixed part (stator) and a moving part (rotor), various emulsions, including cement emulsions, are supplied under pressure. When the rotor rotates in the working chamber, high-frequency acoustic vibrations occur accompanied by cavitation and hydrodynamic phenomena, under the action of which particles of the material of emulsions and suspensions are crushed [6].

Work on the activation of cement suspensions was continued for other cavitators (rotary pulsation apparatus, hydrodynamic emitters), which provide a significant increase in the strength of heavy concrete. Fig. 1 shows diagrams of equipment and pulsed modes.

One of the promising technologies for producing emulsions and dispersions is cavitation grinding technology. Cavitation is a physical phenomenon of the sequential formation, growth and collapse of microscopic bubbles in a liquid. The collapse of the bubble creates high localized temperatures and pressures. The effect of cavitation can be achieved using acoustic and hydrodynamic cavitation.

Acoustic cavitation is induced when high-frequency ultrasonic waves (16 kHz – 100 MHz) pass through a liq-

uid. With the passage of ultrasound through the liquid, zones of increased and reduced pressure are formed, which leads to a rupture of the fluid continuity and the formation of cavitation. Cavitation conditions depend on the intensity and frequency of ultrasound, the physical properties of the liquid, as well as the temperature and solubility of gases [7, 8].

In conditions of hydrodynamic cavitation, a passive hydrodynamic dispersant (hereinafter – PGD) is used to form and collapse the bubbles. Its construction includes cavitation bodies, which are metal rods of circular cross section, when passing through which the continuity of water breaks, and cavitation bubbles form. To ensure high fluid pressure, a vertical centrifugal pump is used, which provides a pressure of up to 6 atm.

The principle of operation of a passive hydrodynamic dispersant is shown in Fig. 2.

If there is effective equipment for additional grinding of mineral particles, it will be possible to ensure high density of concrete at the macro and micro levels, as well as significantly increase its strength.

The physical model of nano-modified concrete can be represented by cement particles of 20–80 μm in size,

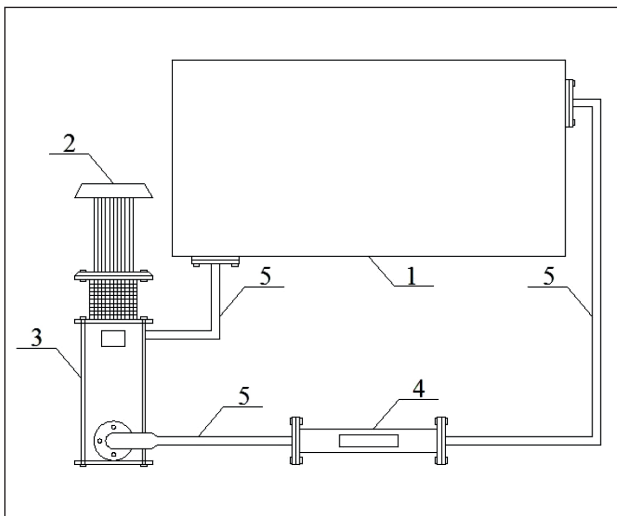


Fig. 2. Diagram of a hydrodynamic cavitation installation
 1 – working capacity for receiving the solution;
 2 – 3 kW electric motor;
 3 – multi-stage multi-row pump;
 4 – passive hydrodynamic dispersant;
 5 – connecting elements

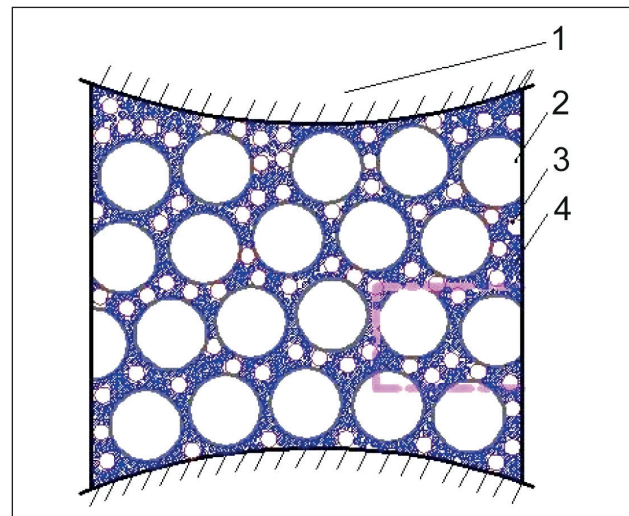


Fig. 3. Nanostructuring of fine-grained concrete
 1 – sand particles;
 2 – cement particles;
 3 – finely ground mineral particles;
 4 – nanoscale particles

Table 2

The composition of fine-grained concrete

Materials Characteristics	Sand, kg/m ³	Cement, kg/m ³	Filler H ₁ , kg/m ³	Filler H ₂ , kg/m ³	Filler H ₃ , kg/m ³
Material consumption	1350–1400	450–500	150–300	75–150	30–75
Grain sizes	0,5–1 mm	20–80 μm	2–8 μm	0,2–0,8 μm	50–90 nm

finely ground mineral particles of 2–8 μm, ultrafine particles – 0.2–0.8 μm and nanodispersed particles <100 nm (0.1 μm), as shown in Fig. 3 [9, 10, 11].

To solve this problem and obtain nanostructured concrete using a 3-fraction filler, it was hypothesized that a high density of the mineral skeleton can be obtained provided that the volume ratio of each subsequent filler fraction to the previous one is 7:3 (8:3) with a diameter fine particles are 8–10 times smaller than coarse particles. The composition used is shown in table 2.

CONCLUSION

The work on concrete nanostructure is of great practical importance and can be implemented using cavitators of various designs for additional grinding. How-

ever, for the technological process, the finely dispersed components prepared by the concrete mixture must have the possibility of long-term storage in the composition of the emulsions. Therefore, the published publications using the name nanocement are erroneous, since nanocement hardens quickly, several times faster than the duration of preparation of the concrete mixture, its transportation, laying and compaction.

To eliminate this phenomenon, it is enough to increase the fineness of grinding of mineral additives, they provide the effect of nanostructuring of concrete and can be stored in suspensions for a long time – up to several days. Therefore, the author in literary sources refers to the patent Nano-binders, which has a great prospect of application in the industry of manufacturing concrete and reinforced concrete [9].

ВВЕДЕНИЕ

В России в качестве минеральных добавок (наполнителей) для бетонных смесей широко используются золы. В табл. 1 представлены результаты исследований свойств бетонов при совместном применении отвалных зол и зол сухого отбора в составе мелкозернистых бетонных смесей. Эти минеральные добавки имеют различные степени дисперсности, отличающиеся на порядок.

Из табл. 1 следует, что применение в качестве наполнителей минеральных добавок различной степени дисперсности обеспечивает снижение расхода цемента с 498 до 300 кг/м³ и получение бетона примерно одинаковой прочности R_{сж} (43,7 и 41,2 МПа) в условиях тепловой обработки изделий через 1 сутки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

С начала 80-х годов автором начаты работы по проблеме и особенностях наноструктурированных многотоннажных материалов. В этом случае наноструктуры охватывают не весь объем материалов, а как бы образуют наноструктурные слои в общем объеме материала. Поэтому можно ожидать получение дополнительных структурных связей и повышение прочности массивных материалов и увеличение технических свойств в 2–2,5 раз [1].

Природная молекулярная нанотехнология собирала системы «снизу-вверх», чем обеспечила многообразие мира и само существование высшей формы материи — «живых организмов». Искусственная нанотехнология создает наносистемы как «снизу-вверх», так и «сверху-вниз». Уже сейчас известны явления самоорганизации, однако для этого предвзительно надо получать наноразмерные частицы [1, 2].

Химические и физические технологии, безусловно, являются основными при получении нанодисперсных частиц (процессы растворения и поликонденсации, криогенные технологии, плазменный способ и многие другие) [3, 4, 5]. По степени дисперсности предложено классифицировать сверхмелкозернистые материалы в зависимости от среднего размера зерен в нм следующим образом [4]:

- тонкодисперсные материалы – 10⁴–10³ нм (10⁻¹ мкм);
- ультрадисперсные материалы – 10³–10² нм (1–10⁻¹ мкм);
- наноматериалы – менее 102 нм (<10⁻¹ мкм).

С точки зрения производительности и себестоимости процесса производства многотоннажных материалов особое место занимают методы механического и механохимического измельчения, которые в промышленных масштабах позволяют получать тонкодисперсные частицы.

Таблица 1

Введение минеральных добавок в виде золы и микрокремнезема в состав песчаных бетонов

№ п/п	Фактический состав бетона, m (масса)*								Жесткость, сек.	Объемная масса, кг/м ³	Водоцементное отношение, В/Ц	Прочность при сжатии R _{сж} , 1 сут. МПа
	m _ц , кг/м ³	m _п , кг/м ³	m _з , кг/м ³	m _{мк} , кг/м ³	m _{мк} , %	m _{с-3} , кг/м ³	m _{с-3} , %	m _в , кг/м ³				
1	567	1120	332					225	40	2191	0,40	45,9
2	498	1285	300					197	40	2250	0,39	43,7
3	380	1458	248					156	40	2205	0,41	30,6
4	485	1063	315	54,6	10	5,46	1	176	40	2010	0,36	56,0
5	443	1269	298	49,5	10	5,05	1	179	40	2200	0,40	48,0
6	315	1347	229	38,0	10	3,88	1	164	20	2040	0,52	34,0
7	460	1135	336	115,0	20	11,50	2	196	40	2225	0,43	64,2
8	412	1328	314	103,0	20	10,50	2	196	40	2320	0,48	58,2
9	300	1432	244	74,8	20	7,48	2	144	40	2166	0,48	41,2
10	408	1151	341	174,5	30	17,40	3	214	40	2274	0,52	65,3
11	315	1164	271	135,0	30	13,50	3	147		2030	0,46	
12	270	1487	253	116,0	30	11,60	3	158	40	2260	0,59	55,7

* m_ц – масса цемента, m_п – масса песка, m_з – масса золы, m_{мк} – масса микрокремнезема, m_{с-3} – количество суперпластификаторов С-3, m_в – масса воды.

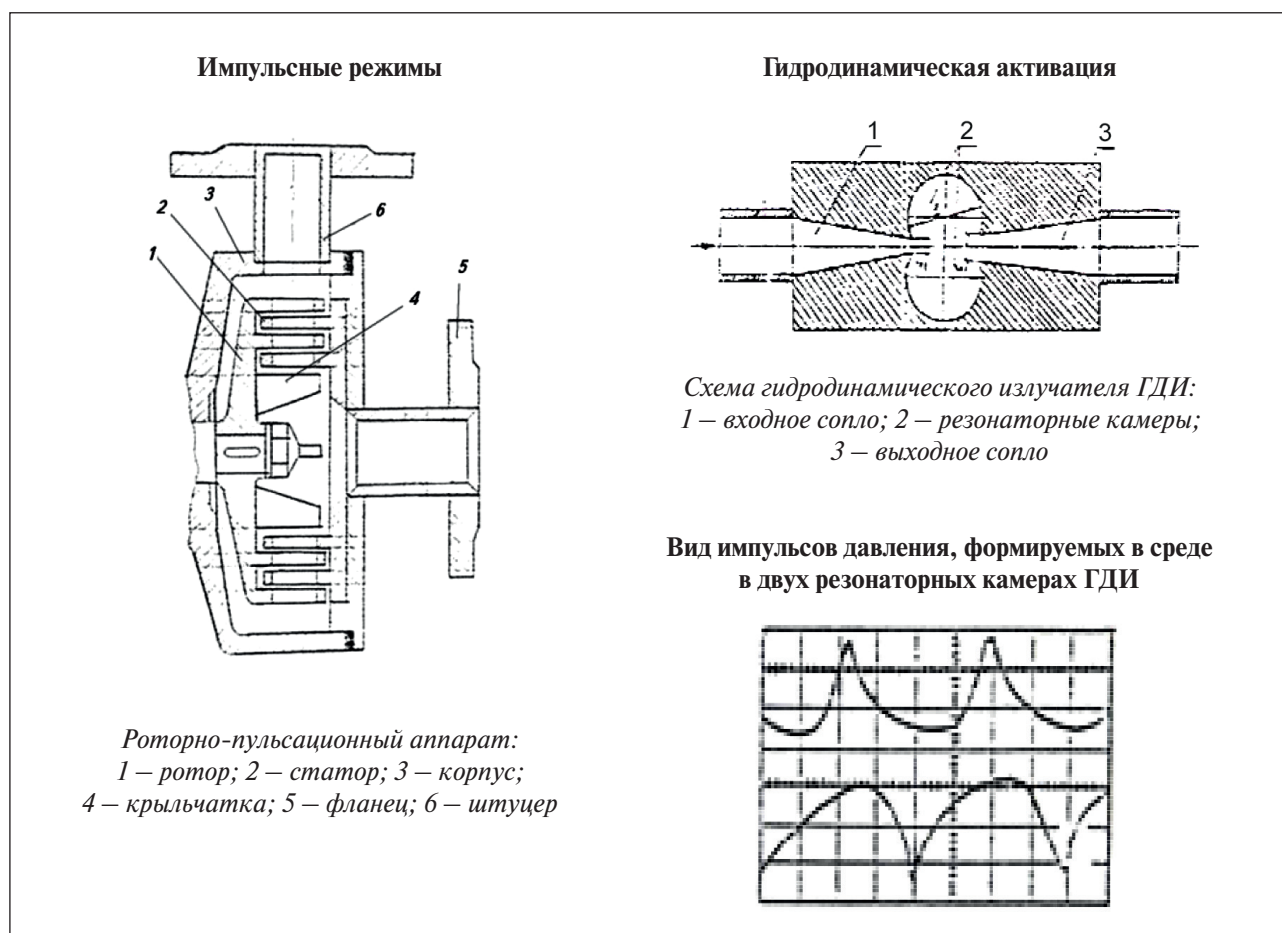


Рис. 1. Волновые процессы активации

В научно-исследовательском институте бетона и железобетона (НИИЖБ) Госстроя СССР под руководством автора уже с 1980-х годов изучали особенности применения режимов активации с использованием вибрационно-импульсных режимов. В качестве оборудования использовали роторно-пульсационный аппарат (РПА), широко применяемый в различных отраслях народного хозяйства для получения эмульсий и суспензий. В рабочую камеру насоса, состоящую из неподвижной части (статора) и подвижной (ротора), под давлением подаются различные эмульсии, в том числе цементные. При вращении ротора в рабочей камере возникают высокочастотные акустические колебания в сопровождении кавитационных и гидродинамических явлений, при действии которых происходят измельчение частиц материала эмульсий и суспензий [6].

Работы по активации цементных суспензий были продолжены для других кавитаторов (роторно-пульсационные аппараты, гидродинамические излучатели), которые обеспечивают существенное

повышение прочности тяжелого бетона. На рис. 1 представлены схемы оборудования и импульсных режимов.

Одной из перспективных технологий получения эмульсий и дисперсий является кавитационная технология измельчения. Кавитация – физическое явление последовательного образования, роста и коллапса микроскопических пузырьков в жидкости. Схлопывание пузырька создает высокие локализованные температуры и давления. Эффект кавитации можно достичь с помощью акустической и гидродинамической кавитации.

Акустическая кавитация индуцируется при прохождении через жидкость ультразвуковых волн высокой частоты (16 кГц – 100 МГц). При прохождении ультразвука через жидкость образуются зоны повышенного и пониженного давления, что приводит к разрыву сплошности жидкости и образованию кавитации. Условия возникновения кавитации зависят от интенсивности и частоты ультразвука, физических свойств жидкости, а также температуры и растворимости газов [7, 8].

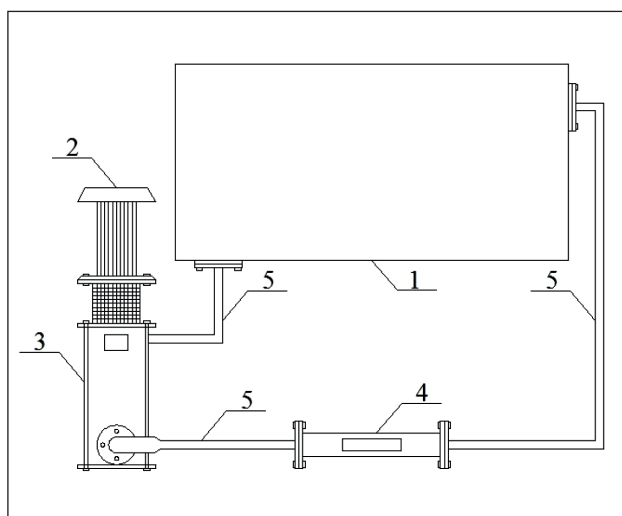


Рис. 2. Схема гидродинамической кавитационной установки

- 1 – рабочая емкость для приема раствора;
- 2 – электрический двигатель мощностью 3 кВт;
- 3 – многоступенчатый многорядный насос;
- 4 – пассивный гидродинамический диспергатор;
- 5 – соединительные элементы

В условиях гидродинамической кавитации для образования и схлопывания пузырьков используется пассивный гидродинамический диспергатор (далее – ПГД). В его конструкцию включены кавитационные тела, представляющие собой металлические стержни круглого сечения, при прохождении через которые сплошность воды разрывается и образуются кавитационные пузырьки. Для обеспечения высокого давления жидкости используется вертикальный центробежный насос, который обеспечивает давление до 6 атм.

Принцип работы пассивного гидродинамического диспергатора представлен на рис. 2.

При наличии эффективного оборудования по дополнительному измельчению минеральных частиц можно будет обеспечить высокую плотность бетона на макро- и микроуровне, а также существенно повысить его прочность.

Таблица 2

Состав мелкозернистых бетонов

Материалы Характеристики	Песок, кг/м ³	Цемент, кг/м ³	Наполнитель Н ₁ , кг/м ³	Наполнитель Н ₂ , кг/м ³	Наполнитель Н ₃ , кг/м ³
Расход материала	1350–1400	450–500	150–300	75–150	30–75
Размеры фракций	0,5–1 мм	20–80 мкм	2–8 мкм	0,2–0,8 мкм	50–90 нм

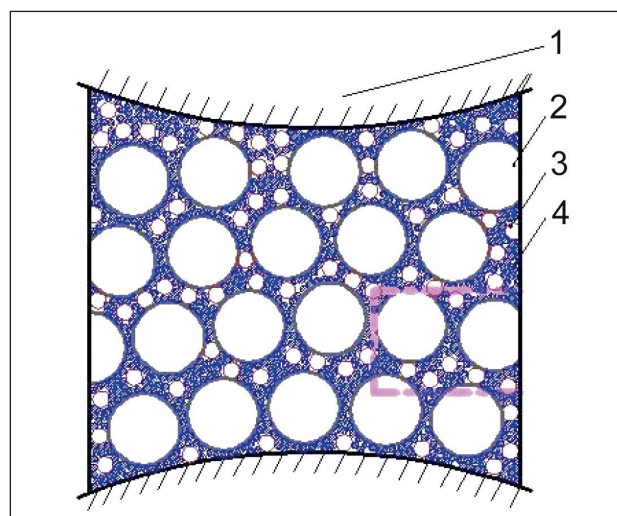


Рис. 3. Наноструктурирование мелкозернистых бетонов

- 1 – частицы песка;
- 2 – частицы цемента;
- 3 – тонкомолотые минеральные частицы;
- 4 – наноразмерные частицы

Физическая модель наномодифицированного бетона может быть представлена частицами цемента размерами 20–80 мкм, тонкомолотыми минеральными частицами 2–8 мкм, ультрадисперсными – 0,2–0,8 мкм и нанодисперсными частицами <100 нм (0,1 мкм), что показано на рис. 3 [9, 10, 11].

Для решения этой задачи и получения наноструктурного бетона с использованием 3-фракционного наполнителя была выдвинута гипотеза о том, что высокую плотность минерального скелета можно получить при условии, что соотношение объемов каждой последующей фракции наполнителя к предыдущей составляет 7:3 (8:3) при диаметре частиц мелкой фракции в 8–10 раз меньше, чем крупной. В работе применялся состав, указанный в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа по наноструктурированию бетона имеет большое практическое значение и может быть реализована с использованием для дополнительного измельчения кавитаторов различной конструкции. Однако для технологического процесса приготовления бетонной смеси тонкодисперсные составляющие должны иметь возможность длительного хранения в составе эмульсий. Поэтому встречающиеся публикации с использованием названия наноцемент ошибочны, так как наноцемент быстро твердеет,

в несколько раз быстрее, чем продолжительность приготовления бетонной смеси, ее транспортировка, укладка и уплотнение.

Для устранения этого явления достаточно увеличивать тонкость помола минеральных добавок, они обеспечивают эффект наноструктурирования бетона и могут храниться в суспензиях длительное время — до нескольких дней. Поэтому автор в литературных источниках ссылается на патент «Нановязущие», что имеет большую перспективу применения в промышленности изготовления бетона и железобетона [9].

REFERENCES

1. Gusev B.V. Razvitie nanonauki i nanotekhnologii [The development of nanoscience and nanotechnology]. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Kompozicionnye stroitel'nye materialy. Teorija i praktika» [International scientific and technical conference «Composite building materials. Theory and practice»]. Penza, Volga House of Knowledge, 2007, p. 70–73. (In Russian).
2. Melekhov I.V. Fiziko-himicheskaja jevoljucija tverdogo veshhestva (nanotekhnologija) [Physical and chemical evolution of solids (nanotechnology)]. Moscow, Publishing House «BINOM. Laboratory of Knowledge», 2006. 309 p. (In Russian).
3. Shabanova N.A., Popov V.V., Sarkisov P.D. Himija i tekhnologija nanodispersnyh oksidov [Chemistry and technology of nanosized oxides]. Moscow, Academic Book, 2007. 309 p. (In Russian).
4. Generalov M.B. Kriohimicheskajanotekhnologija [Cryochemical nanotechnology]. Moscow. Akademkniga, 2006. 332 p.
5. Blinkov I.V., Manukhin A.V. Nanodispersnye i granulirovannye materialy, poluchennye v impul'sivnoj plazme [Nanodispersed and granular materials obtained in impulsive plasma]. Moscow, MISIS, 2005. 367 p. (In Russian).
6. Gusev B.V., Galkina T.Yu. Vibracionno-impul'snyj sposob prigotovlenija trudno smeshivaemyh s vodoj dobavok [Vibration-pulse method of preparation of additives difficult to mix with water]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1983. No. 12. P. 13–14. (In Russian).
7. Li G.Y., Wang P.M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. Carbon. 2005. Vol. 43. P. 1239–1245.
8. Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Shah S.P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. P. 1052–1059.
9. Gusev B.V., Minsadrov I.N., Selivanov N.P. Nanovjazhushhie [Nanobinders]. Russian Federation Patent No. 2412919. 2009. (In Russian).
10. Gusev B.V. Perspektivnye tekhnologii pri proizvodstve sbornogo zhelezobetona [Promising technologies in the production of precast concrete]. Monograph. 2nd Edition. Izhevsk 2015, 206 p. (In Russian).
11. Gusev B.V., Falikman V.G. Concrete and reinforced concrete in the era of sustainable development. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2016. № 2. P. 30–38. (In Russian).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Б.В. Развитие нанонауки и нанотехнологий // Международная научно-техническая конференция «Композиционные строительные материалы. Теория и практика». — Пенза: Поволжский дом знаний, 2007. — С.70–73.
2. Мелехов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества (нанотехнология). — Москва: «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2006. — 309 с.
3. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. — Москва: Академкнига, 2007. — 309 с.
4. Генералов М.Б. Кримохимическая нанотехнология. — М.: Академкнига, 2006. — 325 с.
5. Блинков И.В., Манухин А.В. Нанодисперсные и гранулированные материалы, полученные в импульсивной плазме. — Москва, «МИСИС», 2005. — 367 с.
6. Гусев Б.В., Галкина Т.Ю. Вибрационно-импульсный способ приготовления трудно смешиваемых с водой добавок // Бетон и железобетон. — 1983. — № 12. — С.13–14.
7. Li G.Y., Wang P.M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. Carbon. 2005. Vol. 43. P. 1239–1245.

8. Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Shah S.P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40. P. 1052–1059.

9. Гусев Б.В., Минсадров И.Н., Селиванов Н.П. Нановяжущие // Патент РФ № 2412919. – 2009.

10. Гусев Б.В. Перспективные технологии при производстве сборного железобетона: монография. – Издание 2-ое. – Ижевск. – 2015. – 206 с.

11. Гусев Б.В., Фаликман В.Г. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 2.– С. 30–38.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Boris V. Gusev, Doctor of Engineering, Prof., Corresponding Member of the RAS, RAE Acad., Head of the Department of Construction Materials and Technologies at Russian University of transport, Moscow, Russia, e-mail: info-rae@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гусев Борис Владимирович, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, акад. РИА, зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии» Московского университета транспорта, Москва, Россия, e-mail: info-rae@mail.ru

CONTACTS / КОНТАКТЫ

e-mail: info-rae@mail.ru