

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Докт. техн. наук, проф. ЛЯХЕВИЧ Г. Д., асп. ЗВОННИК С. А., канд. экон. наук, доц. ЛЯХЕВИЧ А. Г. магистрант АЛЬАЗЗАВИ АЮБ БАСИМ АБДУЛХУССЕЙН*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: lfidi@notmail.com

В Беларуси для строительства сооружений используется бетон прочностью не более 60 МПа. В то же время во всех индустриально развитых странах широко применяется высокопрочный бетон прочностью на сжатие выше 60 МПа. В Евросоюзе высокопрочный бетон включен в нормативные документы, что заложило прочную основу для его применения. Высокопрочный бетон получают с использованием высокодисперсных кремнеземистых добавок, например микрокремнезема и пластификаторов (суперпластификаторов), при этом водоцементное отношение должно быть не более 0,4.

Рассмотрены теоретические аспекты создания высокопрочных бетонов для мостовых конструкций. Показано положительное влияние высокодисперсных добавок на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций, а именно: снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция аморфизированным микрокремнеземом; повышение активности минеральных добавок при их тонком измельчении; ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с высокодисперсными частицами добавок, служащими центрами кристаллизации; образование кластеров «вяжущее – добавка» за счет высокой поверхностной энергии частиц высокодисперсных добавок; упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетоне; высокопрочные бетоны значительно быстрее набирают прочность, чем традиционные.

Разработана технология приготовления высокопрочного бетона с использованием высокодисперсных минеральных добавок и суперпластификатора. Применение такого бетона обеспечит более высокую плотность, водо- и газонепроницаемость, повышенную стойкость к агрессивной окружающей среде, сокращение расхода бетона и арматуры и соответственно транспортировочной и монтажной массы, более высокую начальную прочность, раннюю распалубку и предварительное обжатие, увеличение длины пролетов мостовых конструкций, уменьшение поперечного сечения конструкций при сохранении их несущей способности, работающих прежде всего на изгиб. Повышение долговечности мостовых конструкций позволяет увеличить межремонтный период мостовых сооружений, что приведет к значительной экономии материальных и трудовых ресурсов. В ближайшем будущем произойдет постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными.

**Ключевые слова:** теоретические аспекты, высокопрочные бетоны, высокодисперсные добавки, суперпластификатор, смеси, испытания.

Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

## THEORETICAL ASPECTS, EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND EFFICIENCY IN USAGE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE FOR BRIDGE STRUCTURES

*LIAKHEVICH G. D., ZVONNIK S. A., LIAKHEVICH A. G., ALAZZAWI AYUB BASIM ABDULHUSSEIN*

*Belarusian National Technical University*

In Belarus concrete with strength up to 60 MPA is used for construction. At the same time high strength concrete with compressive strength above 60 MPA is widely used in all industrially developed countries. High-strength concrete is included in regulatory documents of the European Union and that fact has laid a solid foundation for its application. High strength concrete is produced using highly dispersed silica additives, such as micro-silica and plasticizers (super-plasticizers) with a water/cement (w/c) ratio not greater than 0.4.

Theoretical aspects of high-strength concrete for bridge structures have been studied in the paper. The paper shows a positive impact of highly dispersed additives on structure and physico-mechanical properties of cement compositions, namely: reduction of total porosity of a cement stone in concrete while increasing volumetric concentration and dispersion of a filler; binding of calcium hydroxide with the help of amorphised micro-silica; increased activity of mineral additives during their thin shredding; acceleration of the initial stage

of chemical hardening of cement compositions with highly dispersed particle additives that serve as centers of crystallization; "binder-additive" cluster formation due to high surface energy of highly dispersed additive particles; hardening of surface area between a cement stone and aggregates in concrete; high-strength concretes are gaining strength much faster than conventional concretes.

Technology of preparation and composition of high-strength concrete using highly dispersed mineral additives and super-plasticizer has been developed in the paper. This concrete will ensure a higher density, water-and gas tightness, increased resistance to aggressive environment, reduced consumption of concrete and reinforcement, reduced transport and installation weight, increased initial strength, early easing of shutters and preliminary compression, increased length of bridge spans, reduced cross-section of constructions while preserving construction bearing capacity, taking bending moment primarily. Improvement of bridge structure durability makes it possible to increase a period between maintenance that will lead to significant savings in material and labor resources. In the near future there will be a gradual replacement of the conventional traditional concretes with multicomponent concretes.

**Keywords:** theoretical aspects, highly-strength concrete, highly dispersed additives, super-plasticizer, mixtures, tests.

Tab. 1. Ref.: 11 titles.

**Введение.** В Беларуси для строительства сооружений используется бетон прочностью не более 60 МПа. В то же время во всех индустриально развитых странах широко применяется высокопрочный бетон прочностью на сжатие более 60 МПа. Это позволяет существенно снизить материалоемкость и повысить долговечность конструкций сооружений и, прежде всего, мостовых, работающих в особо тяжелых условиях. В Евросоюзе высокопрочный бетон включен в нормативные документы, что заложило прочную основу для его применения.

Высокопрочный бетон получают с использованием высокодисперсных кремнеземистых добавок, например микрокремнезема и пластификаторов (суперпластификаторов), при этом водоцементное (В/Ц) отношение должно быть не более 0,4, что обеспечивает уменьшение пористости и повышение прочности матрицы цементного камня.

Высокодисперсные добавки (ВД) положительно влияют на структурообразование бетона («эффект микронаполнителя») [1]. Этот эффект проявляется в том, что мелкие частицы ВД обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент. При увеличении объемной концентрации ВД снижается пористость цементного камня в бетоне. Но при достижении максимума наполнения высокодисперсной добавкой происходит уменьшение прочности бетонов вследствие ухудшения сцепления цементного камня с заполнителем, несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня. В смешанной системе цемента с высокодисперсными добавками желательнее, чтобы дисперсные частицы ВД не

обволакивали поверхность образующихся фаз и не препятствовали срастанию между кристаллогидратами. Это условие может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации высокодисперсной добавки в смешанной системе с учетом ее гидравлической активности.

Для инертной микродобавки оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотнения структуры [2]. Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности дисперсного материала. Экспериментальные данные [3] на цементном тесте с добавкой микрокремнезема показали, что она ускоряет гидратацию портландцемента уже в первые часы после затворения. На субмикроскопических частицах кремнеземистой добавки происходит осаждение продуктов гидратации, причем эти частицы служат центрами нуклеации и кристаллизации. Через одни сутки гидратационного процесса на поверхности частиц происходит хемосорбция  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  из жидкой фазы, а через трое суток начинается пуццолановая реакция.

Повышение прочности вяжущих при введении в их состав высокодисперсных добавок, помимо гидравлической активности, также может быть объяснено образованием наиболее мелкими зернами добавок центров кристаллизации в контактной зоне цемента. «Эффект микронаполнителя» невозможно объяснить только образованием дополнительных центров кристаллизации, поскольку непосредственное их

действие заключается в ускорении начальной стадии химического твердения [4–6]. В основе «эффекта микронаполнителя» лежат как химические процессы взаимодействия цемента с продуктами гидратации, так и физико-химические явления, например влияние поверхностной энергии частиц высокодисперсных добавок.

В присутствии ВД в бетонах происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. В портландцементных бетонах без ВД зона контакта обычно менее плотная, чем цементное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности. Таким образом, контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабой в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность. Введение высокодисперсных кремнеземистых добавок в значительной степени снижает капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Положительное влияние на микроструктуру контактной зоны достигается введением сравнительно небольшого количества минеральной добавки, например микрокремнезема. Исследование влияния кремнеземистой добавки на поверхность раздела заполнителя и цементного камня в высокопрочном бетоне показало, что в промежуточной зоне между заполнителем и цементной матрицей, не содержащими микрокремнезема, наблюдается тонкий поризованный слой, в порах которого обнаружены этрингит и CSH. Такой слой отсутствует в бетоне с добавкой микрокремнезема [7, 8].

В цементных системах, содержащих гидравлически активные минеральные добавки, происходит образование при твердении дополнительного количества CSH за счет взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с активным кремнеземом или алюмосиликатом наполнителя. Следствием этих процессов является образование дополнительных фазовых контактов (контактов срастания между кристаллогидратами) и увеличение плотности цементного камня, что

определяет высокую прочность цементной системы. Исследование микроструктуры бетона с низким исходным водоцементным отношением ( $\text{В/Ц} = 0,24$ ) и добавкой аморфизованного микрокремнезема в количестве 6 % показало отсутствие крупных пластинчатых кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и игольчатых кристаллов этрингита, что обеспечивает высокую плотность цементной матрицы [7].

Такая структура обуславливает высокую прочность бетона как в ранние, так и в поздние сроки твердения. С увеличением удельной поверхности высокодисперсной минеральной добавки прочность бетона возрастает. Многие авторы [4, 9] объясняют это тем, что помол добавок способствует увеличению их активности в цементных системах. Так, помол золы-уноса до удельной поверхности 0,4–0,6 м<sup>2</sup>/г обеспечивает разрушение агломератов зольных частиц, обнажает активные поверхности стекловидных глобулитов [10, 11], что способствует повышению активности зол в цементных системах. Введение тонких частиц минеральных добавок, обычно имеющих размеры 1–20 мкм, должно усиливать влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси, что уменьшает потребность в воде для получения бетона заданной консистенции [6].

При введении в бетон взамен части цемента золы-уноса, состоящей из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности, подвижность бетонной смеси возрастает благодаря уменьшению внутреннего трения бетонной смеси. Причем чем дисперснее зола, а следовательно, чем больше в ней остеклованных шарообразных частиц, тем большее пластифицирующее действие оказывает она на бетонную смесь.

Минеральными пластификаторами могут служить только частицы коллоидно-молекулярного и ионного размеров, образованные в результате химических реакций. Частицы коллоидных размеров создают на своей поверхности сольватную оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы, что придает им смазочные функции, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой за счет действия отталкивающих сил и образования ориентированными молекулами воды плоскостей скольжения по местам более слабых водородных связей. Таким образом, ко-

личество свободной воды, предопределяющей текучесть, сокращается на величину, сравнимую с объемом ультрадисперсной добавки, а вязкость системы соответственно повышается по мере увеличения в ней объемной концентрации микронаполнителя. Но, с другой стороны, адсорбционная пленка уменьшает межмолекулярное взаимодействие твердой фазы и, снижая силу сцепления между частицами на два порядка, ослабляет коагуляционные контакты, придавая им обратимый характер. Поэтому смешанная система с ультрадисперсной добавкой из-за ослабленных коагуляционных контактов при получении вибрационного импульса разжижается. После прекращения вибрационного воздействия коагуляционные контакты восстанавливаются, система может быстро структурироваться и снова становиться вязкой, что является признаком тиксотропности.

Рассмотрев теоретические аспекты создания высокопрочных бетонов для мостовых конструкций, можно заключить:

- имеется положительное влияние высокодисперсных добавок на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций, а именно: снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя; связывание гидроксида кальция аморфизированным микрокремнеземом, повышение активности минеральных добавок при их тонком измельчении; ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с высокодисперсными частицами добавок, служащими центрами кристаллизации; образование кластеров «вяжущее – добавка» за счет высокой поверхностной энергии частиц ВД; упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетоне;

- высокопрочные бетоны значительно быстрее набирают прочность, чем традиционные. Причиной этому служат низкое водоцементное отношение, а также более активное выделение теплоты вследствие быстрой гидратации цемента. Нарастание прочности на растяжение и модуля упругости по времени происходит еще быстрее, чем рост прочности на сжатие. Благодаря малому объему капиллярных пор скорость проникновения жидких и газообразных веществ в высокопрочный бетон значительно ниже аналогичных показателей бетонов

обычной прочности, что обеспечит их более высокую устойчивость к химическому воздействию;

- при оценке долговечности высокопрочных бетонов прогнозирование образования трещин, возникающих на поверхности бетона или в матрице вследствие, например, аутогенной усадки, представляется проблематичным. Процессы, которые с течением времени вызывают деформации бетонов обычной прочности, как правило, также характерны для высокопрочных бетонов: это деформации ползучести, сухая усадка за счет выделения влаги в окружающую среду, аутогенная усадка вследствие внутреннего высыхания и др. Благодаря своим превосходным свойствам, а именно хорошему соотношению прочности к объемной плотности, высокой плотности и долговечности, высокопрочный бетон используется для решения различных практических задач строительства.

С точки зрения современной технологии, производство высокопрочного бетона не представляет принципиальных трудностей. Достижение проектных параметров, а также выбор оптимального состава бетона при использовании ВД и суперпластификаторов требуют научного исследования и экспериментальной проверки его качества.

В этой связи целью исследования является разработка технологии приготовления и состава высокопрочного бетона с использованием высокодисперсных минеральных добавок и суперпластификатора. Для решения задачи были использованы:

- цемент марки М-500, ОАО «Красносельскстройматериалы» ПЦ-Д0: тонкость помола 96,5 %, истинная плотность 3,1072 г/см<sup>3</sup>; величиной удельной поверхности 3406 см<sup>2</sup>/г, активность 51,4 МПа;

- щебень с максимальной крупностью зерен до 20 мм: плотность 2692 кг/м<sup>3</sup>; влажность 0,16 мас. %; содержание глинистых и пылеватых частиц – 0,12 мас. %, марка щебня 1200, соответствует ГОСТ 8267;

- песок кварцевый для строительных работ: ГОСТ 8736, модуль крупности  $M_k = 2,14$ ;

- микрокремнезем марки МК-85 (ТУ5743-048-02495332), подвергался активации при температуре 105–115 °С. Характеристика микрокремнезема после активации: истинная плотность 2,2345 г/см<sup>3</sup>, удельная поверхность

21,86 м<sup>2</sup>/г, в неуплотненном состоянии с насыпной плотностью 174 кг/м<sup>3</sup>;

- зола от сжигания бурых углей Житковичского месторождения (Республика Беларусь) химического состава, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 64,35; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 10,63; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,39; CaO – 13,10; MgO – 1,66; MnO – 0,73; K<sub>2</sub>O – 2,00; Na<sub>2</sub>O – 1,37; TiO<sub>2</sub> – 1,30; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,09; SO<sub>3</sub> – 2,38. Потери при прокаливании – 0,2 мас. %;

- суперпластификатор – натриевая соль сульфоксидата ароматических углеводородов и конденсации с формальдегидом, тип 1 (НСАУКФ-1), получен на кафедре мостов и тоннелей БНТУ по следующей технологии: 1 мас. часть оксидата ароматического нефтепродукта – оксидата экстракта селективной очистки масел обрабатывали 20%-м олеумом в количестве 1 мас. части в течение 60 мин при температуре 145 °С, реакцию обрабатывали формальдегидом (формалином) из расчета 1,0 мас. часть продуктов сульфирования и 1,2 мас. частей формальдегида, конденсацию осуществляли при температуре 125 °С в течение 3 ч при атмосферном давлении, затем реакцию массу нейтрализовали 42,5%-й гидроокисью натрия. Оксидат получали путем каталитического окисления ароматических нефтепродуктов, например экстракта селективной очистки масел, в присутствии 0,5–3,0 мас. % кальцинированной соды при температуре

110–220 °С, расходе воздуха 5–8 л/(мин·кг) в течение 45–180 мин при атмосферном давлении. Характеристика суперпластификатора НСАУКФ-1: массовая доля сухих веществ – 62,9 %; плотность при 20 °С – 1,2761 г/см<sup>3</sup>; показатель активности водородных ионов – 8,24;

- для затворения бетонных смесей применяли водопроводную воду, которая отвечала требованиям СТБ 1114.

В случае производства крупногабаритных мостовых конструкций целесообразно комбинировать портландцемент с золой от сжигания твердого топлива, что авторами учтено при выполнении исследования путем использования золы от сжигания бурого угля Житковичского месторождения.

**Технология приготовления бетонной смеси.** Цемент и золу от сжигания бурых углей подвергали домолу в мельнице, вводили суперпластификатор НСАУКФ-1 и смесь опять подвергали домолу с получением высокодисперсной массы, имеющей удельную поверхность не менее 3700 см<sup>2</sup>/г, вводили мелкий и крупный заполнители, содержимое перемешивали и добавляли воду. Полученной смесью заполняли формы и после отверждения образцы бетона подвергали испытаниям.

Составы бетонных смесей и физико-механические показатели бетонов, полученных из этих смесей, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	Номер состава			
	1	2	3	4
Состав бетонных смесей, мас. %:				
щебень	48,7	48,7	48,7	48,7
песок	22,4	22,8	23,6	22,4
цемент ПЦ-500	22,1	22,1	22,1	22,1
вода	6,8	6,4	5,6	6,8
Добавка, % от массы цемента:				
миккремнезем МК-85	10,0	12,0	12,0	14,0
зола	6,0	8,0	8,0	8,0
суперпластификатор НСАУКФ-1	0,9	1,2	1,2	1,2
Физико-механический показатель образцов бетона:				
плотность, кг/м <sup>3</sup>	2329,0	2342,0	2347,0	2351,0
предел прочности при осевом сжатии, МПа	123,0	136,0	138,0	114,0
предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	12,4	13,9	14,1	11,3
пористость, %	6,2	5,3	5,1	5,2
водопоглощение, %	2,1	1,9	1,8	2,3
морозостойкость, число циклов	> 600,0	> 600,0	> 600,0	> 600,0

Анализ данных табл. 1 показывает, что при содержании в бетонной смеси высокодисперсных добавок 10–14 мас. % микрокремнезема МК-85, 6–8 мас. % золы от сжигания бурого угля Житковичского месторождения, 0,9–1,2 мас. % суперпластификатора НСАУКФ-1 предел прочности бетона при осевом сжатии находится в диапазоне 114–138 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 11,3–14,1 МПа. При этом другие физико-механические показатели бетона соответствовали или превышали требования современных стандартов. Таким образом, получены высокопрочные бетоны, которые после опытно-промышленной проверки смогут быть использованы для изготовления мостовых конструкций.

### ВЫВОДЫ

Применение разработанного высокопрочного бетона для создания мостовых сооружений обеспечит следующие преимущества:

- более высокую плотность, водо- и газонепроницаемость за счет низкого содержания капиллярных пор;
- повышенную стойкость к агрессивной окружающей среде, что будет способствовать более высокой долговечности мостовых конструкций;
- сокращение расхода бетона и арматуры и соответственно транспортировочной и монтажной масс, более высокую начальную прочность, раннюю распалубку и предварительное обжатие, что обеспечит уменьшение сроков ввода в эксплуатацию сооружения;
- уменьшение поперечного сечения конструкций при сохранении и/или увеличении несущей способности конструкций, работающих, прежде всего, на изгиб;
- увеличение длины пролетов мостовых конструкций;
- использование высокодисперсных минеральных добавок и прежде всего зол от сжигания твердого топлива, что будет способствовать увеличению долговечности и эксплуатационной надежности мостов, расширению сырьевой базы для изготовления бетонных и железобетонных конструкций, а также защите окружающей среды от загрязнений. Повышение долговечности мостовых конструкций поз-

воляет увеличить межремонтный период для указанных сооружений, что приведет к значительной экономии материальных и трудовых ресурсов.

В ближайшем будущем произойдет постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными. В таких бетонах будут использоваться как химические модификаторы, так и комплексные добавки различного функционального назначения, улучшающие удобоукладываемость бетонных смесей и способствующие существенному повышению физико-механических показателей бетона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Власов, В. К.** Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / В. К. Власов // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 9–11.
2. **Красный, И. М.** О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей / И. М. Красный // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.
3. **Matsufuji, Y.** Прочностные характеристики растворов, содержащих сверхтонкие частицы / Y. Matsufuji, H. Kohhata, S. Harada // Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr. – 1991. – № 45. – С. 264–269.
4. **Власов, В. К.** Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В. К. Власов // Бетон и железобетон. – 1993. – № 4. – С. 10–11.
5. **Волженский, А.В.** Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников, 2-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1973. – 480 с.
6. **Высоцкий, С. А.** Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // Бетон и железобетон. – 1994. – № 2. – С. 7–10.
7. **Malhotra, V. M.** High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories / V. M. Malhotra, P. K. Mehta–Ottawa, Canada: Printed by Marguardt Printing Ltd., 2002. – 101 p.
8. **Malhotra, V. M.** Pozzolan and Cementitious Materials / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – Gordon and Breech Publishers, 1996. – 191 p.
9. **Bastian, S.** Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych / S. Bastian // Przegląd Budowlany. – 1971. – № 6. – P. 319–329.
10. An investigation of the Pozzolan nature of Coal Ashes // Engineering News. – 1914. – Vol. 71, No 24. – P. 1334–1335.
11. **Баженов, Ю. М.** Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // Изв. вузов. Строительство. – 1996. – № 7. – С. 55–58.

### REFERENCES

1. **Vlasov, V. K.** (1988) Mechanisms for Increase of Concrete Strength While Introducing Micro-Filler. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 10, 9–11 (in Russian).

2. **Krasny, I. M.** (1987) On Mechanism for Increase of Concrete Strength While Introducing Micro-Filler. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 5, 10–11 (in Russian).
3. **Matsufuji, Y.**, Kohhata, H., & Harada, S. (1991) Strength Characteristics of Solutions Containing Super-Fine Particles. *Semento Konkurito Ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr.*, 45, 264–269.
4. **Vlasov, V. K.** (1993) Optimization Regularities of Concrete Composition with Dispersed Mineral Additives. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 4, 10–11 (in Russian).
5. **Volzhenky, A. V.**, Burov, Yu. S., & Kolokolnikov, V. S. (1973) *Mineral Binding Substances*. Moscow, Stroyizdat. 480 p. (in Russian).
6. **Vysotsky, S. A.** (1994) Mineral Additives for Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2, 7–10 (in Russian).
7. **Malhotra, V. M.**, & Mehta–Ottawa, P. K. (2002) High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories. Canada, Printed by Marguardt Printing Ltd. 101 p.
8. **Malhotra, V. M.**, & Mehta, P. K. (1996) Pozzolanic and Cementitious Materials. Gordon and Breach Publishers. 191 p.
9. **Bastian, S.** (1971) Wodoszczelnosc Betonow z Popiolow Lotnych. *Przegląd Budowlany* [Review of Construction], 6, 319–329 (in Poland).
10. **An investigation** of the Pozzolanic nature of Coal Ashes. *Engineering News*, 1914, Vol. 71, No 24, 1334–1335.
11. **Bazhenov, Yu. M.**, Alimov, L. A., & Voronin, V. V. (1996) Development of Theory on Formation of Structure and Properties of Concrete with Technogenic Wastes. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 7, 55–58 (in Russian).

Поступила 13.032014

УДК 621.74/519.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СЛОЕВ ИЗ МИКРОМОДУЛЕЙ В НОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

*Кандидаты техн. наук, доценты СИЗОВ В. Д., НЕСТЕРОВ Л. В.,  
канд. техн. наук, проф. КОПКО В. М.*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: niil\_stisz@bntu.by

Проведен анализ требований к существующим теплоизоляционным слоям в ограждающих конструкциях стеновых панелей, даны общие принципы по разработке систем теплоизоляции, обоснована необходимость разработки новой конструкции стеновой панели с повышенными теплотехническими качествами. Предлагаемая конструкция стеновой панели отличается от существующих тем, что ее наружный слой выполнен из перфорированных в верхней и нижней частях защитных листов с уложенным на них перфорированным слоем алюминиевой фольги. Функцию одного из слоев утеплителя выполняет воздушная прослойка, а второй слой выполнен в виде нескольких слоев микромодулей, разделенных перфорированной алюминиевой фольгой и сеткой. Внутренний слой бетона отделен от слоев микромодулей также алюминиевой фольгой. Защитные листы и сетка могут быть выполнены из алюминия или полиэтилена.

Расположение пустотелых ячеек микромодулей в зоне отрицательных температур предотвращает накопление конденсата. Расположение перфорированных слоев алюминиевой фольги между слоями микромодулей приводит к увеличению термического сопротивления панели за счет снижения лучистой составляющей при наличии нескольких экранов и не препятствует паропроницанию слоев теплоизоляции из микромодулей. Вместе с тем размещение неперфорированного слоя фольги на внутреннем слое панели препятствует проникновению водяных паров из помещений в слои теплоизоляции из микромодулей.

Технологические принципы заключаются в том, что расположение отверстий перфорации в верхней и нижней зонах защитных листов позволяет удалять избыточную влагу из слоев теплоизоляции и воздушной прослойки, что также приведет к повышению теплотехнических качеств, увеличению долговечности и надежности в эксплуатации конструкции в целом. Проведенные расчеты тепловлажностных полей в наружных конструкциях подтверждают преимущества представленного технического решения.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные слои, микромодули, стеновые панели, система теплоизоляции.

Ил. 3. Библиогр.: 10 назв.