

УДК 691-478:666.972.2.002.611

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СОВРЕМЕННЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ**

*канд. техн. наук, доц. Н.Н. КАЛИНОВСКАЯ;
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
канд. техн. наук Д.С. КОТОВ; Е.В. ЩЕРБИЦКАЯ
(Институт БелНИИС, Минск)*

Представлены результаты экспериментальных исследований модифицированных составов бетона для многопустотных плит перекрытий с поликарбоксилатным суперпластификатором нового поколения и тонкодисперсным доломитом. Предложен метод проектирования состава эффективных экономичных бетонов с применением современных материалов для изготовления многопустотных плит перекрытия. Представлены аналитические зависимости для расчета структурных характеристик жестких модифицированных бетонных смесей, удобоукладываемости, физико-механических свойств бетона и режимов тепловлажностной обработки многопустотных плит перекрытия. Изложены положения методики проектирования составов бетона из жестких бетонных смесей на основе математической модели удобоукладываемости бетонной смеси и зависимости прочности бетона, которая включает основные структурные характеристики – эффективное водовязущее отношение бетонной смеси без учета воды, поглощенной заполнителем, коэффициент пластификации теста из вяжущего, объемную концентрацию теста, обеспечивающую раздвижку зерен заполнителя, пустотность смеси мелко и крупного заполнителей в виброуплотненном состоянии.

Ключевые слова: *многопустотные плиты перекрытия, состав бетона, расход цемента, тонкодисперсный минеральный наполнитель, химический модификатор, жесткая бетонная смесь, прочность бетона.*

Введение. Современный подход к подбору состава бетона подразумевает многокомпонентность состава, в том числе состава вяжущего. Такие бетоны имеют низкий удельный расход цемента на единицу прочности бетона при сжатии – 3,5...6 кг/МПа [1]. Эти бетоны удовлетворяют требованиям по прочности, трещиностойкости и др.

Для сохранения требуемых технологических показателей бетонной смеси при снижении расхода цемента необходимо использовать различные тонкодисперсные наполнители с частицами близкого к цементу размера, а также эффективные химические добавки – пластификаторы. Современные пластификаторы обладают сильным пластифицирующим эффектом, что позволяет значительно снизить водовязущее отношение при сохранении требуемой удобоукладываемости бетонной смеси.

Данные подходы и эффективные модификаторы бетона должны активно внедряться на предприятиях стройиндустрии. Однако на многих производствах можно наблюдать некорректно подобранные составы бетона по нормативным документам, не учитывающим современных возможностей модификации структуры бетона, применяемые на протяжении многих лет, с необоснованно высокими расходами цемента. При производстве некоторых изделий, в частности многопустотных плит перекрытий, изготавливаемых из жестких бетонных смесей, химические добавки зачастую не применяются.

То есть на сегодняшний день отсутствует современная методика проектирования состава бетона с применением жесткой бетонной смеси.

**Основные положения методики проектирования состава бетона
для многопустотных плит перекрытия**

При проектировании состава бетона наиболее эффективно применение расчетно-экспериментальных методов, разработанных в Республике Беларусь и применяющихся в течение многих лет [2–7]. Основные параметры структуры и характеристики бетона находятся путем совместного решения системы зависимостей. По результатам расчета устанавливается номинальный состав бетона, который проверяется на соответствие остальным требованиям в лабораторных условиях и при необходимости корректируется.

Предлагаемая методика расчета состава бетона для изготовления многопустотных плит перекрытия включает в себя уже известные существующие зависимости, представленные в [4–7]. Дополнительно были уточнены зависимости влияния структурных и физико-механических характеристик компонентов бетона на межзерновую пустотность смеси заполнителей и уравнение жесткости бетонной смеси, приведенные ранее в работе [8]. Методика в полной мере учитывает влияние на свойства бетонной смеси и бетона дисперсных наполнителей и высокоэффективных химических добавок.

В Республике Беларусь в качестве минеральной добавки в бетон широко применяется доломит тонкодисперсный, выпускаемый по СТБ 2060 [9]. Его применение обеспечивает экономию цемента и удешевление стоимости бетона. Использование доломита в количествах до 40% от массы вяжущего, рекомендованных нормативными документами [6; 7], позволяет получить достаточный объем цементно-минерального вяжущего для достижения реологических свойств бетонной смеси и обеспечения нормируемой прочности бетона.

Выбор химической добавки для энергосберегающей технологии производства многопустотных плит перекрытия имеет первостепенное значение. С точки зрения ускорения твердения бетона наиболее эффективным модификатором является комплекс «суперпластификатор + ускоритель схватывания/твердения». Среди широко распространенных пластифицирующих основ предпочтительно использовать нафталин-сульфонаты или поликарбоксилаты как оказывающие минимальное замедляющее действие на раннюю прочность бетона.

Добавка также должна улучшать реологические характеристики бетонной смеси. Применительно к многопустотным плитам перекрытия это означает уменьшение предельного напряжения сдвига для обеспечения качественного уплотнения и минимально возможного влияния на вязкость бетонной смеси для сохранения геометрии изделий.

Введение тонкодисперсного инертного наполнителя меняет реологические свойства теста из вяжущего. Это обусловлено не только гранулометрическим составом частиц наполнителя, но и взаимодействием между поверхностью наполнителя и пластификатором. В [10] показано, что в случае смешанного вяжущего из цемента и микрокремнезема для разжижения цемента целесообразно использовать поликарбоксилаты на основе метакриловой кислоты, а для диспергации микрокремнезема – аллиловые поликарбоксилаты. Наилучшим вариантом для смешанного вяжущего является смешанный пластификатор. Таким образом, выбор конкретных добавок должен основываться на испытаниях смешанного вяжущего, что позволит минимизировать дозировку суперпластификатора и исключить побочные эффекты от действия разжижителей, такие как повышенное воздухововлечение при увеличении дозировок выше оптимальных, замедление набора прочности.

Для проектирования состава бетона требуются следующие данные:

- класс бетона по прочности на сжатие;
- показатель однородности прочности бетона и соответствующий средний уровень прочности;
- распалубочная и отпускная прочности бетона изделий, % от класса;
- передаточная прочность бетона для предварительно напряженных изделий, % от класса;
- сроки и условия твердения бетона до достижения им заданных показателей качества;
- марка по удобоукладываемости бетонной смеси;
- способы и режимы приготовления и уплотнения бетонной смеси;
- вид вяжущего, марка (класс), прочность при сжатии, группа по эффективности пропаривания, плотность, нормальная густота;
- виды и фракции заполнителей, плотность зерен крупного и мелкого заполнителей, плотность крупного, мелкого и смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии, пустотность крупного и смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии, водопоглощение заполнителей;
- вид, удельная поверхность, плотность дисперсного наполнителя;
- вид и технические характеристики химического модификатора.

Расчет осуществляется в следующей последовательности:

- рассчитывается отношение масс мелкого и крупного заполнителей:

$$n = 1,025 - 0,005 \cdot f_{c.cube}^G ; \quad (1)$$

- вычисляется пустотность смеси заполнителей в виброуплотненном состоянии по формулам, приведенным в [8];

- принимается относительная массовая доля дисперсного наполнителя $r_{д.н}$ не более 0,4;
- определяется относительное содержание химического модификатора $m_{х.д}$, % от массы вяжущего, в соответствии с техническими характеристиками;

- для принятых значений $r_{д.н}$ и $m_{х.д}$ определяются коэффициенты нормальной густоты теста из вяжущего без химического модификатора $K_{н.г}$ и модифицированного $K_{н.г.м}$ (с содержанием химической добавки-пластификатора) по методике ГОСТ 310.3;

- вычисляется коэффициент пластификации теста из вяжущего $K_{пл}$:

$$K_{пл} = 1 - \frac{K_{н.г.м}}{K_{н.г}}. \quad (2)$$

При совместном решении уравнений жесткости бетонной смеси \mathcal{J} и прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток, твердеющего в нормально-влажностных условиях $f_{c.cube}$ [5; 7; 8], находим требуемые значения структурных характеристик бетонной смеси: эффективное водовязущее отношение бетонной смеси без учета воды, поглощенной заполнителем (W) и объемную концентрацию теста (m_T):

$$\mathcal{J} = \left[\left(0,3 + K_g \cdot \left(\frac{W}{K_{н.з(нз)}} - 0,8 \right)^{n_g} \right) \cdot \left(0,002 + 1,3 \cdot \left(\frac{m_{T,1}}{1 - 0,6 \cdot K_{нз}^{0,37}} \right)^{1,7} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$f_{c.cube} = 3,7 \cdot \left(f_{ц.к} \cdot m_m^{-0,3} \right)^{0,595} \cdot \Phi_\tau \cdot \Phi_{д.н} \cdot \Phi_{х.д}, \quad (4)$$

где K_g и n_g – функциональные коэффициенты, зависящие от относительного содержания воздуха в бетонной смеси, определяемые по формулам:

$$K_g = 7,6 - 128 \cdot m_{в.см}, \quad (5)$$

$$n_g = 2 - 10 \cdot m_{в.см}, \quad (6)$$

где $m_{в.см}$ – объемная концентрация содержания воздуха в бетонной смеси, для уплотненной бетонной смеси жесткостью $\mathcal{J} = 11 \dots 20$ с принимаем $m_{в.см} = 0,01 \dots 0,02$; $m_{T,1}$ – объемная концентрация теста, обеспечивающая раздвижку зерен заполнителя, определяется по формуле:

$$m_{T,1} = m_T \cdot \left(1 + \frac{m_{н.з}}{1 - m_{н.з}} \right) - \frac{m_{н.з}}{1 - m_{н.з}}; \quad (7)$$

$f_{ц.к}$ – прочность цементного камня, определяемая по эмпирическим зависимостям [5]; Φ_τ , $\Phi_{д.н}$, $\Phi_{х.д}$ – коэффициенты, отражающие влияние соответственно времени твердения бетона в нормально-влажностных условиях, содержания дисперсного наполнителя и химической добавки, определяются по [7];

- *рассчитывается энергосберегающий режим* тепловлажностной обработки и последующего выдерживания изделий в цеху и на складе готовой продукции в соответствии с [11–13] при полученных значениях структурных характеристик. Режим назначается исходя из условия обеспечения нормируемой передаточной, отпускной, проектной прочностей бетона.

Значение нормируемой отпускной прочности тяжелого бетона для непреднапряженных многослойных плит на сжатие для теплого периода года составляет 70% от требуемой прочности бетона на сжатие, соответствующей его классу. При поставке плит в холодный период года значение нормируемой отпускной прочности бетона может быть повышено до 85% [14]. Исходя из этого распалубочную прочность бетона следует назначать не менее 80% от требуемой, поскольку последующий после тепловой обработки прирост прочности при выдерживании в цехе не превысит 4...9% [13].

При удовлетворении требуемых показателей по прочности производится расчет компонентов бетонной смеси. В случае если рассчитанный состав бетона не обеспечивает нормируемую передаточную или отпускную прочность, необходимо откорректировать состав исходя из условий достижения требуемых значений показателей.

Содержание вяжущей композиции, $\text{кг}/\text{м}^3$, рассчитывается по формуле:

$$G_{в.к} = \frac{(m_m - m_{в.см}) \cdot 10^3}{W + \frac{1000}{\rho_{в.к}}}, \quad (8)$$

где $\rho_{в.к}$ – плотность вяжущей композиции, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Содержание заполнителей, дисперсного наполнителя, цемента, воды и химической добавки рассчитывается в соответствии с [7].

Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент производства ОАО «Кричевцементношифер» ЦЕМ П/В-Ш 32,5Н, ЦЕМ П/А-Ш 42,5Н по ГОСТ 31108;

- тонкодисперсный доломит марки ДТ-1 производства ОАО «Доломит» по СТБ 2060;

- щебень гранитный фракций от 5 до 20 мм I группы РУПП «Гранит» по ГОСТ 8267;
 - песок с модулем крупности $M_k = 2,6$; I класса ОАО «Нерудпром» ДСЗ Минский по ГОСТ 8736;
 - химическая добавка Полипласт ПК-В, являющаяся суперпластификатором, ускорителем схватывания/твердения ООО «ПолипластХИМ», по ТУ ВУ 190679156.002-2013 [15].

Методика апробирована на составах бетона, характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики экспериментальных составов бетона

Класс бетона	$G_{в.к}$, кг/м ³	ДТ-1, % $G_{в.к}$	Полипласт ПК-В, % $G_{в.к}$	n	W	$f_{c.cube}^{т.о}$, МПа	%, $f_{c.тр}$	$f_{c.cube.ф}$, МПа	$f_{c.cube}$, МПа	Откл. Δ, %
портландцемент ЦЕМ II/В-III 32,5 Н ОАО «Кричевцементношифер»										
C ¹⁶ / ₂₀	235	–	–	0,925	0,535	18,2	71	30,3	29,0	5
C ¹⁶ / ₂₀	240	–	–	0,925	0,511	20,5	80	32,1	30,6	5
C ¹⁸ / _{22,5}	255	–	–	0,913	0,501	20,5	71	32,5	31,3	4
C ¹⁸ / _{22,5}	270	–	0,63	0,913	0,432	23,5	82	36,2	40,2	–10
C ²⁰ / ₂₅	285	–	0,60	0,900	0,431	23,5	73	36,1	39,7	–9
C ²⁰ / ₂₅	310	–	0,65	0,900	0,397	27,0	84	39,2	44,6	–12
портландцемент ЦЕМ II/А-III 42,5 Н ОАО «Кричевцементношифер»										
C ²⁵ / ₃₀	295	30	1,1	0,875	0,383	27,8	72	42,0	38,6	9
C ²⁵ / ₃₀	315	30	1,1	0,875	0,359	31,5	82	45,5	41,4	10
C ²⁸ / ₃₅	315	25	1,1	0,850	0,359	31,9	71	46,0	43,9	5
C ²⁸ / ₃₅	330	25	1,1	0,850	0,327	36,3	81	49,0	48,1	2
C ³⁰ / ₃₇	320	25	1,1	0,840	0,338	34,5	73	48,0	47,1	2
C ³⁰ / ₃₇	340	25	1,1	0,840	0,383	38,2	83	50,0	49,6	1

В связи с тем, что некоторые предприятия не имеют возможности дозировать доломитовый наполнитель, по методике были рассчитаны составы бетона без применения доломита, но с использованием поликарбоксилатного пластификатора Полипласт ПК-В.

Заформованные образцы подвергались тепловлажностной обработке. Температурные режимы выдерживания бетона обеспечивались в термостатированной камере с автоматическим управлением. Определение прочности бетона производилось через 2...4 часа после тепловой обработки.

Этапы режима тепловлажностной обработки, рассчитанные по [12; 13]:

- продолжительность предварительного выдерживания $\tau_{пр.в}$ – 1 ч;
- продолжительность подъема до температуры изотермии $\tau_{п}$ – 3 ч;
- температура изотермии $t_{из}$ – 50 °С;
- продолжительность изотермического выдерживания $\tau_{и}$ – 4 ч;
- продолжительность остывания образцов в закрытой камере $\tau_{ост}$ – 9,5 ч;
- общая продолжительность тепловой обработки $\tau_{т.о}$ – 17,5 ч;
- средняя температура тепловой обработки $t_{ср}$ – 41 °С.

Испытания и обработка результатов производились по стандартным методикам:

- определение жесткости бетонной смеси по СТБ 1545;
- определение прочности бетона на сжатие по ГОСТ 10180.

По результатам расчета согласно таблице 1 максимальные значения отклонений расчетных значений прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток, твердеющего в нормально-влажностных условиях $f_{c.cube}$ от опытных $f_{c.cube.ф}$, составили 12%, что свидетельствует о достаточной сходимости математических зависимостей с экспериментальными данными.

Промышленная апробация разработанных составов бетона

Разработанные экспериментально-аналитические зависимости пригодны для подбора состава жесткого бетона пустотных плит перекрытий, изготавливаемых как агрегатно-поточным способом, так и методом безопалубочного формования.

Приведенные в таблице 1 составы бетона рекомендуются для применения на предприятиях строительной индустрии Республики Беларусь и включены в «Каталог номинальных составов бетона», выпущенный РПТУП «Белорусская цементная компания».

Составы бетона многократно апробированы в промышленных условиях на ООО «Современные бетонные конструкции» при производстве плит пустотного настила методом безопалубочного формования на линии «Elematic». Изготавливались пустотные плиты высотой 220 мм, класс бетона по прочности на сжатие С30/37. Промышленные испытания показали, что бетон изделий удовлетворяет требованиям по прочности, геометрия изделий соответствует требованиям проекта.

Заключение

Представлена методика проектирования состава бетона из жесткой бетонной смеси, модифицированной современными высокоэффективными пластификаторами и минеральными наполнителями, в которой доработаны некоторые зависимости физико-механических свойств компонентов, учтены структурные характеристики бетона.

Разработанная экспериментально-аналитическая зависимость жесткости бетонной смеси при совместном решении с уравнением прочности бетона на сжатие имеет достаточную сходимость математических зависимостей с экспериментальными данными.

Методика расчета применена при разработке составов для «Каталога номинальных составов бетона», разработанного РУП «Институт БелНИИС» для РПТУП «Белорусская цементная компания».

Составы бетона для многпустотных плит перекрытия безопалубочного формования апробированы в промышленных условиях на ООО «Современные бетонные конструкции».

Таким образом, запроектированные и опробованные в лабораторных и промышленных условиях составы бетона соответствуют требуемым показателям: марке по удобоукладываемости бетонной смеси, нормируемой передаточной (для предварительно напряженных плит), отпускной и проектной прочности бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 103–106.
2. Блещик, Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и бетона / Н.П. Блещик. – Минск : Наука и техника, 1977. – 232 с.
3. Рекомендации по определению составов обычного и пластифицированного бетонов с учетом условий тепловой обработки и данных статистического контроля прочности / ИСиА Госстроя БССР. – Минск, 1984. – 70 с.
4. Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ, разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации : отчет о НИР (заключ.) / РУП «Институт БелНИИС» ; рук. Н.П. Блещик. – Минск, 2007. – 417 с. – № ГР 20053268.
5. Блещик, Н.П. Проектирование состава товарного бетона, модифицированного химическими добавками и минеральными наполнителями / Н.П. Блещик, Н.Н. Калиновская, А.Н. Рак // Товарный бетон – новые возможности в строительных технологиях : материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 3–5 апр. 2008 г. / ХГТУСА ; редкол.: А.В. Ушеров-Маршак [и др.]. – Харьков, 2008. – С. 64–78.
6. Рекомендации по подбору состава высококачественного бетона высотных зданий : Р5.03.078.10 / РУП «Институт БелНИИС». – Минск, 2010. – 13 с.
7. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления = Бетонныя і жалезабетонныя вырабы і канструкцыі з самаўшчыльняльнага бетону. Правілы вырабу : ТКП 45-5.03-266-2012 (02250). – Введ. 01.03.2013. – Минск : Стройтехнорм, 2013. – 36 с.
8. Щербицкая, Е.В. Структурные, технологические и физико-механические свойства жестких виброуплотненных бетонных смесей / Е.В. Щербицкая // Строительная наука и техника. – 2007. – № 3. – С. 47–53.

9. Доломит тонкодисперсный для бетонов и строительных растворов. Технические условия = Даламіт тонкадысперсны для бетонаў і будаўнічых раствораў. Тэхнічныя ўмовы : СТБ 2060-2010. – Введ. 01.09.2010. – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 12 с.
10. Plank J. Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compability with Silica Fume / J. Plank // *Jornal of Advanced Concrete Technology*. – 2009. – № 7. – P. 5–12.
11. Проектирование состава бетона и режима тепловой обработки железобетонных конструкций / Н.П. В.В. Блещик [и др.] // *Строительная наука и техника*. – 2006. – № 3 (6). – С. 37–42.
12. Блещик, Н.П. Энергосберегающие режимы тепловой обработки и выдерживания длинномерных многопустотных плит перекрытий высотой поперечного сечения 300 мм / Н.П. Блещик, Е.В. Щербицкая // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура*. – 2004. – № 1. – С. 27–35.
13. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки = Цеплавільготнасная апрацоўка зборных бетонных і жалеабетонных вырабаў : ТКП 45-5.03-13-2005(02250). – Введ. 01.01.2006. – Минск : Стройтехнорм, 2006. – 64 с.
14. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия = Пліты пакрыццяў і перакрыццяў жалеабетонныя для будынкаў і збудаванняў. Тэхнічныя ўмовы : СТБ 1383-2003. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 24 с.
15. Добавки «Полипласт» для бетонов и строительных растворов на поликарбоксилатной основе : ТУ BY 190679156.002-2013. – Введ. 15.02.2013. – Минск : ПолипластХИМ, 2013. – 9 с.

Поступила 07.06.2018

NUMERICAL DEPENDENCIES AND METHOD OF DESIGNING CONCRETE MIXES OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW CORE SLABS

N. KALINOUSKAYA, D. KOTOV, A. SHCHARBITSKAYA

The results of experimental studies of modified compositions of concrete for multi-hollow floor slabs with a polycarboxylate superplasticizer of new generation and finely dispersed dolomite are presented. A method for designing the composition of efficient eco-friendly concretes using modern materials for the manufacture of hollow-core floor slabs is proposed. Analytical dependencies are presented for calculating the structural characteristics of rigid modified concrete mixes, workability, physical and mechanical properties of the concrete and modes of heat and moisture treatment of hollow-core floor slabs. The positions of the design of concrete compositions of rigid concrete mixtures based on the mathematical model of the workability of the concrete mix and the dependence of the strength of concrete, which includes the main structural characteristics – the effective water binding ratio of the concrete mix excluding water absorbed by the aggregate, the coefficient of plasticization of dough from the binder, the volume concentration of dough, which ensures the separation of the aggregate grains, the voidness of the mixture of fine and coarse aggregates in a vibropacked state.

Keywords: *hollow-core slabs, concrete composition, cement consumption, fine mineral filler, chemical modifier, rigid concrete mix, concrete strength.*