

УДК 691.33

UDC 691.33

ПРИМЕНЕНИЕ УКАТАННЫХ БЕТОНОВ В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**APPLICATION OF THE ROLLED CONCRETE IN WATER ECONOMIC BUILDING**

Федоров Виктор Матвеевич
к.т.н., профессор
Новочеркасская государственная мелиоративная академия, Новочеркасск, Россия

Fedorov Victor Matveevich
Cand.Tech.Sci., professor
Novocherkassk State Reclamation Academy, Novocherkassk, Russia

В статье описан опыт применения укатанных бетонов при строительстве сооружений и даны основы моделирования производства плит из жёстких бетонных смесей

In the article the experience of application of the rolled concrete at building of constructions is described and bases of modeling of manufacture of plates from rigid concrete mixes are given

Ключевые слова: УКАТАННЫЕ БЕТОНЫ, ЖЁСТКАЯ СМЕСЬ, ЦЕМЕНТ, БЕТОНИРОВАНИЕ, УПЛОТНЕНИЕ КАТКАМИ, ПРОЧНОСТЬ, СБОРНЫЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОН, ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, ПРЕССОВАНИЕ, ВАЛЬЦЫ, ДАВЛЕНИЕ, СЛОЙ, ЧИСЛО ПРОХОДОВ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ФАКТОРЫ

Keywords: ROLLED CONCRETE, RIGID MIX, CEMENT, CONCRETING, CONSOLIDATION BY SKATING RINKS, RESISTANS ,PRECAST CONCRETE, HASHING, PRESSING, ROLLERS, PRESSURE, LAYER, NUMBER OF PASSES, MATHEMATICAL MODEL, FACTORS

С начала 80-х годов за рубежом (США, Япония, ФРГ, Великобритания, Испания и др.) интенсивно развивается новое направление в технологии ведения бетонных работ, основанное на применении укатанных бетонов (УБ).

Впервые уплотнение малоцементных жёстких смесей катками было исследовано и проверено опытным путём американскими организациями – Инженерными войсками США и управлением по развитию водного, энергетического и сельского хозяйства долины р. Теннесси. В США в 1985-1986 гг. за 10 месяцев была построена плотина (Аппер Стиллуоттер) из укатанного бетона. Объём уложенного бетона 1223 тыс. м³, высота плотины 91 м, длина по гребню 815 м, полезный объём водохранилища 37 млн м³. Следует подчеркнуть, что расход цемента не превышал 80 кг/м³. Внимания заслуживает плотина и КС Иеллсу-Крик, построенные за 4 месяца. Высота плотины 76 м, а расход цемента 45 кг/м³. Учитывая, что при традиционных способах бетонирования расход цемента 200-400 кг/м³, американский опыт вызвал огромный практический интерес. В дальнейшем

Корпус военных инженеров США применил укатанные бетоны для стабилизации береговых склонов и противоэрозионной защиты, для бетонирования открытых каналов, водосбросных лотков и т.д. [1].

В Югославии укатанные бетоны были использованы при строительстве водобойных колодцев и зданий ГЭС. Заслуживает внимания применение УБ при бетонировании аварийных водосливов типа «плавная вставка» в составе гидроузлов, построенных в 1980-90 гг. На основе накопленного опыта укладки УБ в гидротехнические сооружения установлено, что, несмотря на имеющуюся неоднородность УБ, технология их применения эффективна и экономична [2].

В Японии на р. Окава построена плотина из особо жёсткой бетонной смеси, уплотнённой катками. В составе укатанного бетона использованы некондиционные заполнители из отходов различных производств и микрозаполнители в виде зольной, известковой и каменной пыли. Наряду с экономическим аспектом данных работ просматривается их экологическая направленность [2].

В Бразилии при возведении гидроузла Сако Симон, судоходного шлюза Тукури и водосбросных сооружений плотины Тре Марио применены укатанные бетоны с уменьшенной щелочной реакцией заполнителей. Согласно бразильскому опыту, для этого достаточно заменить 5-7 % цемента вспененным кремнезёмом. Электростанция Итаипу на бразильско-парагвайской границе была построена с применением уплотняемого катками бетона. Материал для бетонирования фундаментов, водосбросных лотков, откосов каналов доставляли автомобилями-самосвалами, распределяли с помощью гусеничных тракторов слоями толщиной 0,08-0,15 м и уплотняли вибрационными катками [2].

Атомные электростанции обычно строятся на монолитных бетонных фундаментах, отличающихся высокой прочностью и надёжностью. Оказалось, что наиболее выгодным материалом для них является уплотняемый

укаткой бетон. В Пакистане при сооружении крупнейшей электростанции Тарбела такой бетон был использован и для возведения значительной части засыпки, потребовавшейся для усиления участков тоннеля, подверженных обрушению, а также для бетонирования откосов канала в нижней части водосброса. В последнем случае уплотнение производилось с помощью катков «Динапак СА 51» [2].

В Китае при строительстве гидроузла Кенжу применены малоцементные укатанные бетоны с добавкой золы-унос. Повышенная водонепроницаемость плотины была достигнута устройством асфальтового экрана на напорной грани. Укладка смеси осуществлялась послойно. Уплотнение уложенной бетонной смеси производилось одним 8-тонным виброкатком. Оптимальное уплотнение получено при 10 проходах катка и толщине слоя бетона 0,3-0,5 м. Первый год эксплуатации сооружений гидроузла показал их высокую надёжность [2].

В Марокко реализован проект плотины Редат однородного треугольного профиля с высотой 23 м из укатанного бетона. На гребне плотины шириной 7 м уложен двухметровый слой вибрированного бетона с вертикальными стенками, в котором заложены трубы диаметром 1 м для пропуска малых расходов воды. Для укладки бетонной смеси применялась опалубка в виде решётки, охватывающей по высоте два слоя укатки и крепящейся металлическими анкерами к уложенным слоям бетона. В процессе проектирования проведены исследования по подбору гранулометрического состава заполнителя, дозировки цемента, определению модуля деформации, прочности на сжатие и фильтрации бетона [2].

В ФРГ разрабатываются бетоноукладочные комплексы для непрерывного формования на полигонах и заводах многопустотных железобетонных панелей, плит перекрытий, перегородок, плит креплений откосов, ригелей и др. [2].

В Испании выполнен большой комплекс исследований по проблеме

использования укатанного бетона в гидротехническом строительстве. В частности установлено влияние различного содержания золы-уноса на значение водоцементного отношения, процесс гидратации и на усадочные свойства бетона. Опыт строительства ГТС из укатанного бетона в Испании показывает, что положительные результаты достигаются при более высоком соотношении крупных и мелких фракций заполнителей, чем это необходимо для обычного (вибрированного) бетона. Необходимое уплотнение бетонной смеси обеспечивается, как правило, виброкатками массой 12 т, при толщине уплотняемых слоёв 0,4 м. Разработаны специальные технологические мероприятия для обеспечения надёжного контакта между слоями бетонирования по высоте. Характерно, что значения упругих модулей укатанного бетона обычно ниже, чем у обычного бетона, однако, для плотности имеет место обратное соотношение [2].

В 1985 г. Нарынгидроэнергостроем в сопрягающую стенку Ташкумырского гидроузла уложено 6500 м³ УБ [3]. Опытно-исследовательские работы велись ВНИИГом, Средазгидропроектом и Оргэнергостроем. Отработка технологии бетонирования осуществлялась на полигоне Курпсайской ГЭС, где в производственных условиях было уложено 1050 м³ УБ, и изучены его свойства.

Исследовательские работы по применению укатанных бетонов в мелиорации и водном хозяйстве в настоящее время ведутся на Украине. Усилия учёных направлены на разработку новых рабочих органов, совершенствование бетоноукладочных комплексов и систем машин. Разрабатываются составы и технологии укладки малоцементных жёстких смесей, причём, за основу берутся местные строительные материалы и отходы местных производств.

Из приведённых выше сведений следует, что укатанные бетоны получают из бетонных смесей особо жёсткой консистенции уплотнение которых производится катками, трамбовками или тяжёлыми автомашинами.

Применяют катки или трамбовки как статического, так вибрационного и динамического действия [2].

Укатанные бетоны применяются для различных сооружений, отдельных их частей и конструктивных элементов. Наиболее широко использованы они при возведении гравитационных плотин, дамб, подпорных и сопрягающих стен, отдельных устоев, плит крепления рисберм и водобоев, водопроводящих и водосбросных трактов, фундаментов зданий и сооружений.

Отмечая бесспорные достоинства укатанных бетонов необходимо отметить и их недостатки. Так, прочность на сжатие этих бетонов не превышала прочности бетонов класса В15 (М200), морозостойкость ограничивалась маркой бетона по морозостойкости F100, проницаемость – маркой по водонепроницаемости W2. В этой связи, применение укатанных бетонов, до недавнего времени, ограничивалось возведением сооружений методом «монолитной кладки». В производстве сборного железобетона подобные технологии не использовались.

Лишь в начале 90-х годов в Германии разрабатываются и внедряются бетоноукладочные комплексы для непрерывного формования на полигонах и заводах ЖБИ многопустотных панелей и плит перекрытий, перегородок, плит креплений, ригелей и других железобетонных изделий. Практически одновременно (1988 г.) в НПО «Югмелиорация» и НГМА разрабатываются технологии производства плит, панелей и покрытий дорог из прессованно-укатанных бетонов [4].

Для моделирования процесса укладки и уплотнения особо жёсткой бетонной смеси при производстве плит и панелей была разработана и изготовлена установка, обеспечивающая разравнивание, прессование, укатку и заглаживание особо жёсткой бетонной смеси. Особо жёсткая бетонная смесь разравнивается поступательно перемещающимся скребком, прессу-

ется ребристыми (или гладкими) вальцами, укатывается и заглаживается гладкими вальцами. Прессующие вальцы кинематически связаны между собой, ребра выполнены по форме цилиндрической винтовой линии. При этом обеспечивается принудительное перемешивание, и перетираание частиц бетонной смеси, достигается их более устойчивая ориентация и плотная упаковка [4].

Приготовление смеси осуществляется вручную. Затем смесь укладывается в специальную призматическую форму, где изготавливают образцы-призмы размером 100×100×400 мм.

Для прессования и последующей укатки жёсткой бетонной смеси, уложенной в призматическую форму, равномерным вывинчиванием регулировочных винтов поднимают «подъёмные» площадки установки до уровня кромок призматической балочной формы, после чего приступают к уплотнению смеси. Скорость перемещения установки может изменяться от 0,5 до 15 м/мин. и регулируется переключением передач в коробке привода.

Давление, передаваемое вальцами на бетонную смесь при прессовании и укатке, может варьироваться в интервале от 0,1 до 0,8 МПа. Максимальное контактное давление, оказывающее основное влияние на прочность укатанного бетона, определяется по формуле

$$q_{max} = K_{\Gamma} \sqrt{q_{л} \cdot E_o / R_{в}} , \quad (1)$$

где $q_{л}$ – линейное давление, н/м;

E_o – модуль деформации, Па;

$R_{в}$ – радиус уплотняющего вальца, м;

$K_{\Gamma} = 0,5$ – безразмерный коэффициент, для неподвижного вальца.

После прессования, укатки и заглаживания жёсткой бетонной смеси, призматическая форма с изделием извлекается из ниши, форма разбирает-

ся, а образец – балочка помещается в камеру для хранения в течение суток при повышенной влажности. После пропарки часть балочек используется для определения предела прочности бетона на растяжение при изгибе, а часть – для определения предела прочности бетона на сжатие. Для определения предела прочности бетона на сжатие, часть балочек распиливается на стандартные образцы-кубы. Для испытаний образец устанавливается боковой гранью на нижнюю плиту пресса центрально относительно его оси. Нагрузка на куб возрастает непрерывно с постоянной скоростью 0,4-0,6 МПа/с до его полного разрушения. Достигнутое в процессе испытания максимальное усилие принимается за разрушающую нагрузку. Предел прочности бетона при сжатии R , МПа вычисляется по формуле

$$R = a \frac{P}{F}, \quad (2)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

F – средняя рабочая площадь образца, м²;

a – переводной коэффициент к прочности стандартного образца.

Для определения предела прочности бетона на растяжение при изгибе балочка устанавливается на испытательное устройство, представляющее собой стол с двумя цилиндрическими опорами, диаметром 30 мм и длиной 120 мм.

Нагрузка на середину балочки передаётся через опору с таким же диаметром и длиной. Нагрузка на середину балочки возрастает непрерывно постоянной скоростью. Предел прочности бетона на растяжение при изгибе $R_{\text{при}}$, МПа для образца балочки вычисляется по формуле

$$R_{\text{при}} = g \frac{P \cdot l}{a \cdot b^2}, \quad (3)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

l – расстояние между нижними опорами, мм;

a, b – размеры поперечного сечения, мм;

g – переводной коэффициент к прочности стандартного образца.

Для приготовления бетонной смеси использовался портландцемент марки 500 Новороссийского завода «Октябрь». В качестве микрозаполнителя использована зола-унос Новочеркасской ГРЭС, представляющая собой тонкодисперсный порошок, образующийся из минеральной части каменных углей, сжигаемых в пылевидном состоянии в топках котлоагрегатов и осаждаемых из дымовых газов золоулавливающими электрофильтрами. В качестве крупного и мелкого заполнителя использованы: щебень фракции 5-20 мм из известняка Быстрореченского карьера с содержанием пылевато-глинистых частиц 1,8 %; песок Волжский с модулем крупности 1,52, не удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-93 по зерновому составу.

Время перемешивания компонентов определялось из условия получения смеси требуемой однородности. Приготовленную смесь укладывали в одну из приготовленных призматических форм, обеспечивающих изготовление балочек (ширина – 100 мм, высота – 100 мм, длина – 400 мм) или плит, имеющих ширину – 500 мм, высоту – 100 мм, длину – 500 мм. Бетонную смесь укладывали в предварительно смазанную отработанным машинным маслом форму. После укладки первой порции смеси последняя разравнивалась равномерным слоем, прессовалась и укатывалась. Толщина слоя, число слоёв при формовании балочки или плиты, удельное контактное давление, число проходов рабочих органов по одному следу назначались по плану эксперимента, согласно проводимому опыту. На уплотнённый первый слой бетонной смеси укладывали вторую порцию и равномерно её распределяли по первому уплотнённому слою. Далее весь технологический процесс последовательно повторялся.

Для получения математических моделей, отражающих процессы структурообразования, был выбран трехфакторный план Бокса-Бенкина второго порядка: X_1 – число слоёв при формовании конструкции заданной высоты; X_2 – максимальное контактное давление при укатке; X_3 – число проходов рабочего органа укатывающего механизма по одному следу.

Этот план с одной центральной точкой совпадает с симметричным квази-Д – оптимальным планом, т.е. с одним из «равномерно лучших» планов для размерностей $k = 2 - 7$ [5]. В качестве оптимизирующей функции отклика системы были приняты прочностные характеристики уплотненного укаткой тяжелого щебеночного бетона, выраженные в процентах по отношению к проектной прочности контрольных образцов (100 %, М300, В25).

Расход составляющих в экспериментальных составах укатываемой бетонной смеси был принят следующим: цемент (Ц) = 250 кг/м³, зола-унос (З) = 180 кг/м³, песок (П) = 510 кг/м³, щебень (Щ) = 1300 кг/м³, пластификатор формиатно-спиртовый (Д) = 9 л/м³, вода (В) = 150 кг/м³.

Условия кодирования и варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование и варьирование факторов

Факторы	Код X_i	Основной уровень, X_o	Интервал варьирования DX_i	Нижний уровень «-»	Верхний уровень «+»
Число слоёв	X_1	2	1	1	3
Контактное давление, МПа	X_2	0,5	0,3	0,2	0,8
Число проходов по одному следу	X_3	6	4	2	10

Матрица и результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица реализации плана эксперимента

Номер опыта	План			X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	Прочность в 28 суток, у, %
	X_1	X_2	X_3							
1	0	+	+	0	+	+	0	0	+	98
2	0	-	-	0	+	+	0	0	+	38
3	0	-	+	0	+	+	0	0	-	77
4	0	+	-	0	+	+	0	0	-	72
5	+	0	+	+	0	+	0	+	0	120
6	-	0	-	+	0	+	0	+	0	53
7	-	0	+	+	0	+	0	-	0	83
8	+	0	-	+	0	+	0	-	0	76
9	+	+	0	+	+	0	+	0	0	103
10	-	-	0	+	+	0	+	0	0	54
11	+	-	0	+	+	0	-	0	0	76
12	-	+	0	+	+	0	-	0	0	83
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96
$\Sigma X_j y$	102	111	139	648	601	617	-2	14	-13	1029

Расчёт значений коэффициентов квадратичного уравнения регрессии произведён по известной методике [5].

$$b_0 = (0y) - 0,5[(11y) + (22y) + (33y)] = 1029 - 0,5(648 + 601 + 617) = 96$$

$$b_1 = 0,125(1y) = 0,125 \cdot 102 = 12,8;$$

$$b_2 = 0,125(2y) = 0,125 \cdot 111 = 13,9;$$

$$b_3 = 0,125(3y) = 0,125 \cdot 139 = 17,4 ;$$

$$b_{11} = 0,25(11y) - 0,0625[(11y) + (22y) + (33y)] - 0,5\bar{y}_0 = \\ = 0,25 \cdot 648 - 0,0625(648 + 601 + 617) - 0,5 \cdot 96 = -2,6;$$

$$b_{22} = 0,25(22y) - 0,0625(648 + 601 + 617) - 0,5 \cdot 96 = -14,4;$$

$$b_{33} = 0,25(33y) - 0,0625(648 + 601 + 617) - 0,5 \cdot 96 = -10,4;$$

$$b_{12} = 0,25(12y) = 0,25 \cdot (-2) = -0,5;$$

$$b_{13} = 0,25(13y) = 0,25 \cdot 14 = 3,5;$$

$$b_{23} = 0,25(23y) = 0,25 \cdot (-13) = -3,3. \tag{4}$$

В результате математической обработки экспериментальных данных и проверки статистических гипотез адекватности и информативности по F-критерию на 5 % уровне значимости, получена математическая модель исследуемого технологического процесса, которая с доверительной веро-

ятностью $P=0,95$, отражает зависимость относительной прочности изучаемого бетона от исследуемых технологических факторов в виде

$$\hat{y}_1 = 96 + 12,8x_1 + 13,9x_2 + 17,4x_3 - 2,6x_1^2 - 14,4x_2^2 - 10,4x_3^2 - 0,5x_1x_2 + 3,5x_1x_3 - 3,3x_2x_3. \quad (5)$$

Полученная математическая модель (5) свидетельствует о том, что все три исследуемых фактора существенно влияют на прочность уплотняемого укаткой тяжёлого щебеночного бетона. Судя по величине и знакам коэффициентов модели, наибольшее влияние из них оказывает фактор x_3 – число проходов рабочего органа формующей установки по одному следу. Математическая модель (5) является уравнением гиперповерхности функции отклика в четырёхмерном гиперпространстве, что делает невозможным её графическое представление.

Анализ модели (5), описывающей влияние исследуемых технологических факторов на относительную прочность щебеночного бетона, показывает, что прочность однозначно возрастает по мере увеличения числа проходов рабочего органа. В связи с этим, для анализа модели (5), зафиксируем фактор x_3 (число проходов рабочего органа по одному следу) на верхнем уровне варьирования $x_3 = +1$. После чего нетрудно получить локальную двухфакторную математическую модель в виде

$$\hat{y}_1 = 103 + 16,3x_1 + 10,6x_2 - 2,6x_1^2 - 14,4x_2^2 - 0,5x_1x_2. \quad (6)$$

Анализ полученной модели показывает, что при количестве слоёв укатываемого щебеночного бетона больше одного ($x_1 \geq 0$), существует довольно обширная область факторного пространства, обеспечивающая с доверительной вероятностью $P=0,95$ получение укатанного бетона класса не меньше В25 (марки 300) с уменьшенным в 1,7 раза расходом цемента, по сравнению с обычным вибрированным бетоном. При укатке же одного слоя тяжёлого щебеночного бетона для достижения указанных прочностных показателей, необходимо увеличить либо расход цемента, либо кон-

тактное давление на бетонную смесь при её укатывании.

Список литературы

1. Савинов О.А. Об одной из неотложных проблем перестройки в гидроэнергетике. // Гидротехническое строительство. 1989. № 1. С. 9-11.
2. Коган Е.А., Сахаров В.И. Бетонная гравитационная плотина из укатанного бетона и способ её поярусного возведения. // Гидротехническое строительство. 1988. № 11. С. 5-8.
3. Рекомендации по применению укатанных бетонов в гидротехническом строительстве / В.Б.Судаков, М.А.Картелева, Г.К.Симаков, В.С.Шангин и др. Л.: Изд. ВНИИГ. 1985. 35 с.
4. А.С. № 1818240 СССР. 1993. МКИ В28 В13/02. Рабочий орган для уплотнения бетонной смеси.
5. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 262 с.