

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО СОСТАВА БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЛОТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА

И.М. Иванов, Л.Я. Крамар

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Произведён выбор материалов, повышающих эффективность бетонов, предложен подход к оптимальному использованию гранулированного доменного шлака. В целях получения высокого экономического эффекта реализована оптимизация состава бетона с учётом динамики набора его прочности, для чего выведены упрощённые уравнения твердения бетона, являющиеся ядром разработанной математической модели. Контроль качества принятых материалов, испытания бетонных смесей на удобоукладываемость и образцов бетона на прочность проведены в соответствии с действующими стандартами России. Обработка полученных данных выполнена в программном обеспечении Microsoft Excel, а получение уравнений и графиков поверхностей откликов – в StatSoft STATISTICA. Проведён планированный эксперимент, в котором варьируемыми факторами приняты: расход цемента (от 280 до 440 кг на 1 м³ бетона) и содержание шлака в цементе (от 24 до 76 %). В каждой точке плана произведён экспериментальный подбор параметров состава бетона, получены уравнения и графики поверхностей откликов для этих параметров. Испытания образцов бетона на прочность при нормальных условиях твердения стремились выполнять на 3, 7 и 28-е сутки, а при твердении с тепловой обработкой (7 ч, 70 °С) – на 1, 7 и 28-е сутки. По средним значениям прочности в фактические сроки испытания для всех полученных составов определены уравнения твердения, из которых вычислена прочность ровно в 1-е и 28-е сутки для всех точек плана, а затем получены уравнения поверхностей отклика по прочности. Последние необходимы для вычисления прочности любого из плана состава бетона к заданному сроку по ранее выведенным упрощённым уравнениям твердения. Эти и другие полученные уравнения объединены в математическую модель, состоящую из блоков: вводных параметров, вычисления прочности, вычисления параметров состава бетона, расчёта расхода компонентов и оценки себестоимости. Представленная в статье математическая модель через разработанные виджеты в среде Excel позволяет быстро и достаточно точно решать задачу оптимизации – для выбранных условий твердения назначать состав бетона с минимальной себестоимостью и условием обеспечения требуемой прочности к заданному сроку.

Ключевые слова: математическая модель, оптимизация состава бетона, высокоэффективный бетон, молотый гранулированный доменный шлак (МГДШ), портландцемент (ПЦ или ЦЕМ I), шлакопортландцемент (ШПЦ или ЦЕМ III), отсев дробления щебня.

Введение

Основными направлениями развития науки и технологии цементов и бетонов являются уменьшение выбросов CO₂ при производстве цементного клинкера, получение долговечных бетонов и снижение расходов на их производство. Использование гранулированного доменного шлака (ГДШ) в производстве шлакопортландцемента или молотого гранулированного доменного шлака (МГДШ) в производстве бетонов отлично решает проблему выброса вредных веществ и задачу утилизации многотоннажных отходов металлургии [1, 2]. Многочисленными исследованиями доказано, что цементы, содержащие от 20 до 80 % шлака, в сравнении с портландцементом позволяют получать бетонные смеси с улучшенными реологическими характеристиками и сохраняемостью [3], а бетоны – с низкой экзотермией [4, 5], повышенной прочностью на растяжение при изгибе [1, 6] и трещиностойкостью [7]. В возрасте ≥ 28 суток бе-

тоны на цементах со шлаком имеют пониженную пористость структуры цементного камня [8, 9], обеспечивающую высокие показатели по водонепроницаемости [10, 16], прочности на сжатие [5, 10, 11] и стойкости к истиранию [1, 12]. Состав гидратов, представленный низкоосновными гидросиликатами кальция с низким содержанием Са(ОН)₂ и гидратов алюминатных фаз [13], обеспечивает бетонам на основе такого цемента надёжную защиту от самых различных химически агрессивных сред [5, 14, 15]. При низком водоцементном отношении все эксплуатационные характеристики бетонов на шлакопортландцементе повышаются, в том числе и морозостойкость [16]. Всё это предопределяет повышенную долговечность бетонов на шлакопортландцементе.

Однако технологи часто отмечают, что экономическая эффективность шлакопортландцемента стала ниже в сравнении с портландцементом. Поэтому объём производства шлакопортланд-

цемента сегодня составляет всего 2,5 % от общего объёма производства общестроительных цементов в России, в 1990 году этот показатель составлял 28 % [17]. Причин этому несколько, первая из них – медленный темп твердения шлакопортландцемента. Добавки-ускорители гидратации цементов не позволяют достичь достаточной эффективности [18], единственным способом активации шлака в составе цемента остаётся тепловая обработка [19]. Второй причиной являются новые рыночные условия и отсутствие государственного планирования и регулирования в цементной отрасли и сфере переработки шлаков, что зачастую делает невыгодным применение шлакопортландцемента как специально производимого цемента по ГОСТ 10178-85 или ГОСТ 31108-2016, получаемого совместным помолом клинкера, гранулированного доменного шлака, гипса и добавок. Повысить эффективность гранулированного доменного шлака в составе цемента можно за счёт применения технологии дозирования портландцемента и молотого гранулированного доменного шлака сразу на бетонном заводе. В Европе уже нередко применяют такой подход, он регламентирован EN 206-1:2013, вошедшим в национальный стандарт РФ – ГОСТ Р 57345-2016, в соответствии с которым МГДШ можно применять в производстве бетонов по одной или нескольким из трёх концепций, суть которых коротко раскрыта далее.

Применяя **концепцию использования коэффициента k** , содержание цемента в бетоне определяют как *ЦЕМ I или ЦЕМ II/A + k ·МГДШ*, а водоцементное отношение как *вода / (ЦЕМ I или ЦЕМ II/A + k ·МГДШ)*. Полученные значения должны соответствовать требованиям к минимальному содержанию (расходу) цемента и максимальному В/Ц для соответствующего класса среды эксплуатации бетона, предельные значения которых указаны в табл. F1 ГОСТ Р 57345-2016, а также в табл. D1 ГОСТ 31384-2017. Стандартом рекомендуется значение коэффициента k принимать равным 0,6, а соотношение *МГДШ / (ЦЕМ I или ЦЕМ II/A) ≤ 1,0*, то есть рекомендуется использовать не больше 50 % МГДШ в цементе. При применении шлака в большем количестве его избыток не следует учитывать в расчёте содержания цемента и водоцементного отношения. Допустимо использовать более высокий коэффициент k , более высокую долю МГДШ в цементе, применять несколько наполнителей и другие типы цементов, если пригодность этих изменений доказана. Эту концепцию рекомендуется применять для рядовых бетонов, приготавливаемых на обычных заполнителях, цементах и наполнителях, характеристики которых удовлетворяют требованиям стандартов.

При применении **концепции равнозначных технологических характеристик бетона** необходимо подтвердить, что бетон определённого состава соответствует всем предъявляемым к нему требованиям, особенно по долговечности. Если

требуемые характеристики бетона не известны, то назначаемый состав сравнивается с контрольным, приготовленным в полном соответствии требованиями по классу среды эксплуатации. Для назначаемого состава в этой концепции допускаются отклонения по минимальному содержанию цемента и максимально допустимому В/Ц, главное – обеспечить все требуемые эксплуатационные характеристики бетона. Данную концепцию следует применять, когда качество компонентов имеет отклонения от требований стандартов, применяются специальные добавки, особые методы перемешивания, укладки бетонной смеси, ухода за бетоном и т. д.

Применяя **концепцию равнозначных технологических характеристик комбинаций цемента и МГДШ**, сначала проводят идентификацию типа цемента, который удовлетворяет требованиям для нужной среды эксплуатации и имеет состав, подобный предусмотренной комбинации. Затем на сравниваемых цементах изготавливают образцы и проводят оценку показателей прочности и долговечности. По этой концепции МГДШ может полностью включаться в расчёт минимального содержания цемента и максимального водоцементного отношения, которые должны удовлетворять предельным значениям из табл. F1 ГОСТ Р 57345-2016 для соответствующего класса среды эксплуатации. Данную концепцию лучше использовать для производства бетонов, стойких к химически агрессивным средам, так как в этом случае испытания сводятся к сравнению коррозионной стойкости цементов.

Таким образом, стандарты позволяют достаточно широко применять технологию дозирования ПЦ и МГДШ на бетонных заводах, хотя в России такого опыта ещё нет. Далее перечислены преимущества этой технологии, которые могут значительно повысить эффективность шлака в составе цемента.

1. Существенно снижаются расходы на транспортировку шлака, он напрямую поставляется до бетонного завода, минуя цементный.

2. МГДШ не будет иметь добавленную стоимость цементного завода.

3. Снижается зависимость бетонных заводов, а также предприятий, выпускающих МГДШ, от цементных заводов, что способствует оздоровлению конкуренции в цементной отрасли.

4. Цена на МГДШ, в отличие от цен на ПЦ и ШПЦ, более стабильна, поскольку зависит только от затрат на грануляцию, помол и доставку. Это повышает привлекательность МГДШ перед конечным потребителем.

5. Отдельно молотый ГДШ может иметь высокую удельную поверхность в сравнении со шлаком, получаемым при его совместном помоле с цементным клинкером. Оптимальная удельная поверхность ПЦ, как правило, не более 350 м²/кг, а МГДШ – 500...520 м²/кг, поэтому их совместный

помол не может быть эффективным. По предложенной технологии можно применять другую мельницу, обеспечивающую наиболее эффективный помол именно ГДШ. К тому же для одного материала оптимизацию помола и подбор нужных добавок произвести легче, а возможностей для этого становится больше.

6. ГДШ, молотый до повышенной удельной поверхности, будет не только быстрее гидратировать в цементе, но и лучше заполнять пустоты между зёрнами портландцемента, что приведёт к дополнительному ускорению твердения, повышению прочности и плотности цементного камня бетона.

7. Становится возможным введение при помоле ГДШ добавок-активаторов и других добавок, которые лучше вводить при отдельном помоле. При совместном помоле ГДШ с цементным клинкером ряд добавок могут работать хуже.

8. Возможность использования бетонным заводом наиболее эффективного цемента, в соответствии с текущими условиями производства, поскольку можно применять любое процентное содержание шлака в цементе в любое время.

9. Расширение номенклатуры выпуска бетонов за счёт возможности использования любой дозировки МГДШ. Возможен выпуск специальных бетонов, например бетонов с необходимой экзотермией, химической стойкостью, водонепроницаемостью, морозостойкостью [16] и как следствие – долговечностью.

10. Переход на работу с одним видом высокоактивного портландцемента – ЦЕМ I 42,5 Н (ПЦ 500-Д0) или выше.

Сегодня единственным предприятием в России, выпускающим молотый гранулированный доменный шлак как отдельный продукт, является ООО «Мечел-Материалы». Этот молотый шлак имеет удельную поверхность $510 \pm 10 \text{ м}^2/\text{кг}$, обеспечивающую оптимальное соотношение затрат на помол и качества получаемого продукта [20]. В данной работе использован именно этот МГДШ.

Снизить расходы на производство бетона и повысить его качество можно с использованием современных поликарбоксилатных суперпластификаторов. Такие добавки имеют высокий водоредуцирующий эффект, за счёт чего можно существенно снизить водоцементное отношение, что приведёт к сокращению расхода цемента, ускорению его твердения и повышению эксплуатационных характеристик бетона. Однако эти добавки весьма чувствительны к глинистым минералам, которые всегда содержатся в природном песке [21]. Для решения этой проблемы следует применять мытые пески, с содержанием пылевидных и глинистых частиц не более 2 %, или использовать искусственные пески из отсева дробления щебня. Последние обычно имеют повышенную водопотребность, но, как правило, значительно дешевле и не содержат вредных примесей. Практика показывает, что отсева эффективнее природ-

ных песков, особенно с применением поликарбоксилатных суперпластификаторов.

С применением технологии двухкомпонентного цемента, включающего ПЦ и МГДШ, существенным резервом сокращения себестоимости становится оптимизация состава бетона с учётом скорости его твердения. Это актуально, так как многие предприятия в России и мире имеют крайне непостоянный объём и сроки заказов, из-за этого загрузка производственных линий постоянно меняется и требует от технолога быстрых решений. Без получения необходимых зависимостей в каждой конкретной ситуации очень сложно поделиться с тем, какой состав бетона является наиболее эффективным для обеспечения требуемой прочности к заданному сроку.

В связи с этим целью работы является получение математической модели для назначения в каждом конкретном случае высокоэффективного состава бетона. Для этого необходимо решить следующие основные задачи:

- вывести упрощённое уравнение твердения – ядро математической модели;
- подобрать оптимальные значения параметров составов бетонов, испытать их образцы на прочность и обработать полученные данные;
- построить математическую модель;
- решить задачу оптимизации, которая состоит в том, чтобы найти минимальный по себестоимости состав бетона, который обеспечит требуемую прочность к заданному сроку твердения.

1. Материалы, методы испытаний и средства обработки данных

Подбор составов бетонов проводили в соответствии с ГОСТ 27006-2019, используя следующие компоненты:

- щебень гранодиоритовый фракции 5–20, АО «Первая нерудная компания»;
- песок из отсева дробления щебня, АО «Первая нерудная компания»;
- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, АО «Катавский цемент»;
- молотый гранулированный доменный шлак (торговое название GreenCems GGBS), ООО «Мечел-Материалы»;
- поликарбоксилатный суперпластификатор PlaBet, ООО «Промэкс-М».

Испытание бетонной смеси на удобоукладываемость выполняли по ГОСТ 10181-2014, оценку подвижности бетонной смеси проводили по ГОСТ 7473-2010. В качестве образцов использовали кубы с ребром 10 см. Для каждого срока испытания и всех точек плана изготавливали не менее 2 образцов как для твердения в нормальных условиях, так и с тепловой обработкой. Режим тепловой обработки: выдержка – 30 минут, изотермический прогрев при 70 °С в течение 7 часов, охлаждение – 30 минут. Испытание бетона на прочность прово-

дили по ГОСТ 10180-2012, оценку прочности – по ГОСТ 18105-2010.

Обработку полученных данных проводили с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA. Расчёт составов бетонов на лабораторные замесы, журнал испытания образцов бетона на прочность, формирование и обработку сводных данных вели с помощью Excel. На основе полученных сводных данных строили графики поверхностей откликов и получали их уравнения регрессии в программе STATISTICA. Далее полученные уравнения объединяли в математическую модель и интегрировали её в среду Excel, создав виджеты для удобного и быстрого вычисления состава бетона, его прочности и себестоимости через вводимые данные по расходу цемента, содержанию шлака в цементе и сроку твердения. К разработанным виджетам в среде Excel добавили надстройку «поиск решения», через которую можно выполнять решение задачи оптимизации состава бетона всего через два аргумента: срок твердения и требуемая прочность бетона к этому сроку.

2. Аппроксимация динамики набора прочности бетона

Ядром и особенностью создаваемой математической модели является внедрение функции твердения, поэтому важно получить простое уравнение для аппроксимации динамики набора прочности в итоговой модели. В данном разделе получены такие уравнения как для твердения в нормальных условиях, так и для твердения после тепловой обработки.

2.1. Уравнение регрессии для твердения бетона в нормальных условиях

Зависимость прочности (R) от времени твердения бетона (t) в нормальных условиях достаточно точно описывает логарифмическая регрессия:

$$R = a + b \cdot \ln t \quad (1)$$

$$b = \frac{n \sum (R_i \ln t_i) - \sum \ln t_i \sum R_i}{n \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2};$$

$$a = \frac{\sum R_i - b \sum \ln t_i}{n},$$

где n – количество точек, по которым проводится регрессия.

В целях получения наиболее простого уравнения для упрощения общей математической модели примем только две точки, одну ровно в 1-е сутки, другую – в 28-е сутки, тогда:

$$\begin{aligned} b &= \frac{2(R_1 \ln 1 + R_{28} \ln 28) - (\ln 1 + \ln 28)(R_1 + R_{28})}{2((\ln 1)^2 + (\ln 28)^2) - (\ln 1 + \ln 28)^2} = \\ &= \frac{2R_{28} \ln 28 - R_1 \ln 28 - R_{28} \ln 28}{2(\ln 28)^2 - (\ln 28)^2} = \\ &= \frac{R_{28} \ln 28 - R_1 \ln 28}{(\ln 28)^2} = \frac{\ln 28(R_{28} - R_1)}{(\ln 28)^2} = \frac{R_{28} - R_1}{\ln 28}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{R_1 + R_{28} - b(\ln 1 + \ln 28)}{2} = \\ &= \frac{R_1 + R_{28} - \frac{R_{28} - R_1}{\ln 28} \ln 28}{2} = \\ &= \frac{R_1 + R_{28} - R_{28} + R_1}{2} = R_1; \end{aligned}$$

$$R = R_1 + \frac{R_{28} - R_1}{\ln 28} \ln t = R_1 + (R_{28} - R_1) \log_{28} t;$$

$$R = R_1 + (R_{28} - R_1) \log_{28} t. \quad (2)$$

2.2 Уравнение регрессии для твердения бетона после тепловой обработки

Зависимость прочности (R) от времени твердения бетона (t), прошедшего тепловую обработку, достаточно точно описывает степенная регрессия:

$$R = a \cdot t^b. \quad (3)$$

$$b = \frac{n \sum \ln t_i \ln R_i - \sum \ln t_i \sum \ln R_i}{n \sum (\ln t_i)^2 - (\sum \ln t_i)^2}; a = e^{\frac{\sum \ln R_i - b \sum \ln t_i}{n}},$$

где n – количество точек, по которым проводится регрессия.

В целях получения наиболее простого уравнения для упрощения общей математической модели, примем только две точки, одну ровно в 1-е сутки, другую в 28-е сутки, тогда:

$$\begin{aligned} b &= \frac{2(\ln 1 \ln R_1 + \ln 28 \ln R_{28}) - (\ln 1 + \ln 28)(\ln R_1 + \ln R_{28})}{2((\ln 1)^2 + (\ln 28)^2) - (\ln 1 + \ln 28)^2} = \\ &= \frac{2 \ln 28 \ln R_{28} - \ln 28 \ln R_1 - \ln 28 \ln R_{28}}{2(\ln 28)^2 - (\ln 28)^2} = \\ &= \frac{\ln 28 \ln R_{28} - \ln 28 \ln R_1}{(\ln 28)^2} = \frac{\ln 28(\ln R_{28} - \ln R_1)}{(\ln 28)^2} = \\ &= \frac{\ln R_{28} - \ln R_1}{\ln 28}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= e^{\frac{(\ln R_1 + \ln R_{28}) - b(\ln 1 + \ln 28)}{2}} = e^{\frac{\ln R_1 + \ln R_{28} - \frac{\ln R_{28} - \ln R_1}{\ln 28} \ln 28}{2}} = \\ &= e^{\frac{\ln R_1 + \ln R_{28} - \ln R_{28} + \ln R_1}{2}} = e^{\ln R_1} = R_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= R_1 \cdot t^{\frac{\ln R_{28} - \ln R_1}{\ln 28}} = R_1 \cdot t^{\frac{\ln \frac{R_{28}}{R_1}}{\ln 28}} = \\ &= R_1 \cdot t^{\log_{28} \frac{R_{28}}{R_1}} = R_1 \cdot \left(\frac{R_{28}}{R_1} \right)^{\log_{28} t}; \end{aligned}$$

$$R = R_1 \cdot \left(\frac{R_{28}}{R_1} \right)^{\log_{28} t}. \quad (4)$$

3. Планирование и проведение эксперимента

Серия экспериментов проведена в соответствии с планом, представленным на рис. 1. В качестве факторов приняты расход цемента с диапазоном варьирования от 300 до 420 кг/м³ и содержание молотого гранулированного доменного шлака в цементе с диапазоном варьирования от 30 до 70 %.

Строительные материалы и изделия

Точки плана на рис. 1 нанесены с учётом корректировки составов по плотности, после которой несколько изменился расход цемента, содержание молотого ГДШ после корректировки не изменилось, поскольку оно принято в процентах от массы цемента.

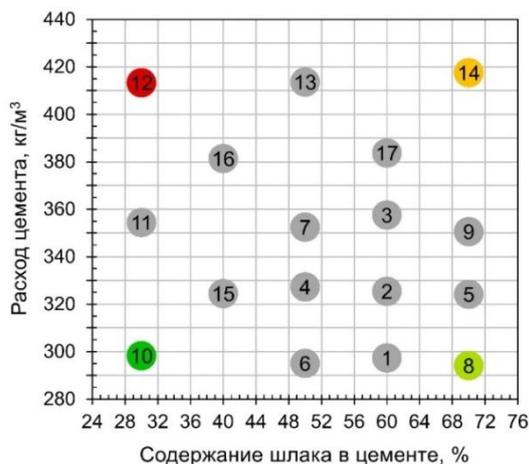


Рис. 1. Пронумерованные точки плана

Нестандартное положение точек плана обусловлено необходимостью его расширения после получения предварительных результатов, которые показали, что в ранние сроки для точек плана 1–9 прочность может быть недостаточной при высокой оборачиваемости форм или опалубки. В данной работе проработано 17 точек плана, достаточно 9. Практика показывает, что математически не планированный подбор составов бетона приводит к тому, что приходится точно подбирать всё новый и новый состав бетона, и в результате нет понимания, какой состав эффективнее, хотя разработанных составов становится очень много.

Для каждой точки плана в первую очередь выполняли подбор оптимальной доли отсева в заполнителях по объёму (γ), обеспечивающей наи-

лучшую подвижность бетонной смеси. После подбора величины γ для всех точек плана уточняли минимальное водоцементное отношение, позволяющее получить марку бетонной смеси по подвижности П5, при дозировке суперпластификатора 0,85 % от массы цемента. Предварительно установлено, что для данного суперпластификатора такая дозировка является оптимальной. Визуализация результатов подбора величин γ и В/Ц представлена на рис. 2, уравнения поверхностей откликов приведены в таблице. Таким образом, определены все параметры составов бетонов.

После установления оптимальных значений параметров составов были изготовлены образцы и испытаны на прочность при нормальных условиях твердения в возрасте 3, 7 и 28 суток, а также после тепловой обработки через 30 минут, на 1-е и 28-е сутки, с регистрацией фактических сроков испытания. По полученным средним значениям прочности в различном возрасте для всех 17 составов выведены уравнения твердения, как в примере на рис. 3 для угловых точек плана (№ 8, 10, 12 и 14 по рис. 1). Аппроксимация динамики набора прочности для нормальных условий твердения проведена по логарифмической регрессии (уравнение (1)), а для образцов, прошедших тепловую обработку, – по степенной (уравнение (3)). Это очень просто выполняется в Excel выделением ряда данных на диаграмме и добавлением соответствующей линии тренда и её уравнения.

С целью получения математической модели на основе упрощённых уравнений твердения (уравнения (2) и (4)) по полученным функциям аппроксимации динамики твердения определена прочность всех 17 составов (точек плана) ровно в 1-е и 28-е сутки при нормальном твердении и твердении после тепловой обработки. Далее вычислены уравнения поверхностей откликов, которые приведены как R_1 и R_{28} в математической модели (см. таблицу), где имеются ссылки на их графики.

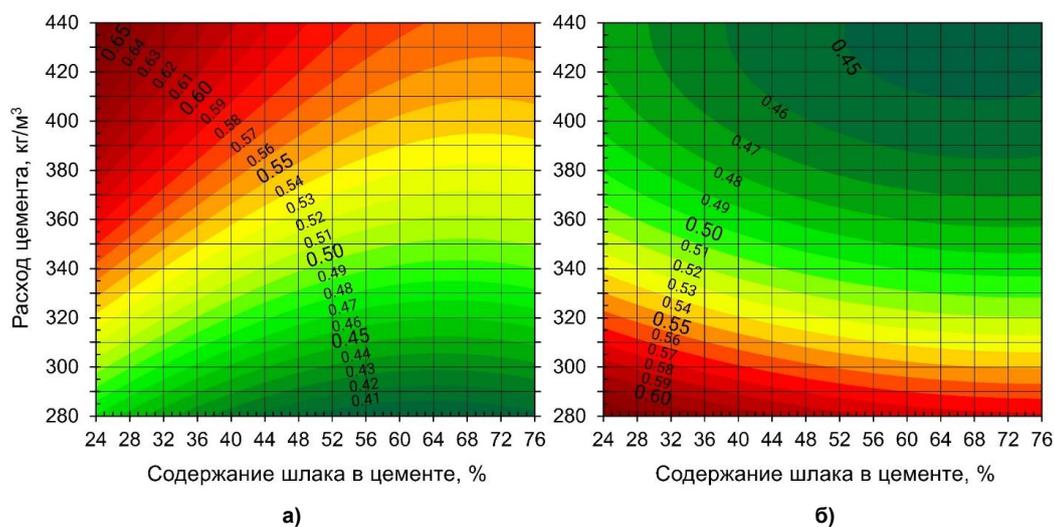


Рис. 2. Изолинии поверхностей для параметров состава бетона, величин γ (а) и В/Ц (б)

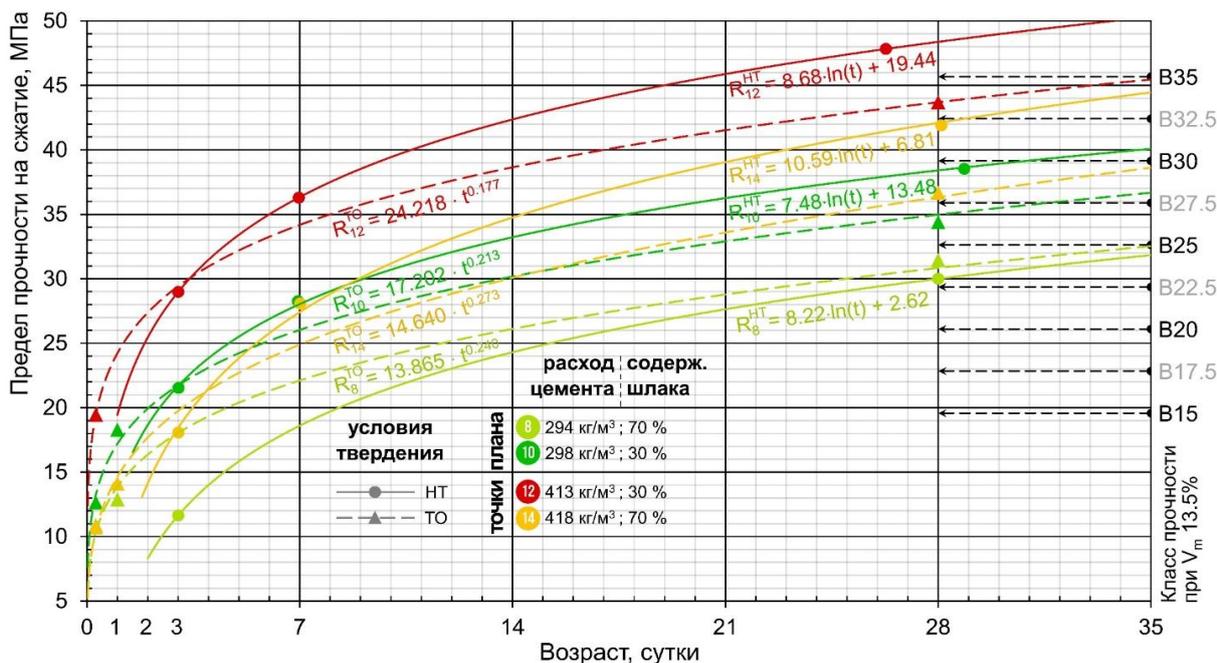


Рис. 3. Результаты испытания бетона на прочность с аппроксимацией на логарифмическую (для нормальных условий твердения) и степенную (для образцов, прошедших тепловую обработку) функции для угловых точек плана

4. Построение математической модели

Представленная в таблице математическая модель состоит из 5 взаимосвязанных блоков: блок вводных параметров, блок вычисления прочности, блок вычисления параметров состава бетона, блок расчёта расхода компонентов и блок оценки себестоимости 1 м^3 бетонной смеси.

В первом блоке указываются вводные параметры: срок твердения (t), расход цемента (Π) и содержание шлака в цементе (Ш). Задавая эти три параметра, можно вычислить состав бетона, его себестоимость и прочность к заданному возрасту (сроку твердения). В этом блоке содержится и параметр требуемой прочности ($R_{\text{тр}}$), который необходим в дальнейшем при решении задачи оптимизации.

Второй блок предназначен для вычисления прочности бетона по упрощённым уравнениям твердения, выведенным в разделе 2, которые также представлены в таблице как R . Эти уравнения позволяют определить прочность бетона в конкретный срок твердения (t) через прочности в 1-е и 28-е сутки, которые вычисляются по уравнениям поверхности отклика R_1 и R_{28} соответственно и зависят от вводимых данных по расходу цемента (Π) и содержанию шлака в цементе (Ш). Таким образом, прочность бетона вычисляется по трём аргументам:

- срок твердения (до 35 суток);
- расход цемента (от 280 до 440 $\text{кг}/\text{м}^3$);
- содержание шлака в цементе (от 24 до 76 %).

В третьем блоке вычисляются параметры состава бетона: доля отсева в заполнителях по объёму (γ) и водоцементное отношение ($\text{В}/\Pi$) по приведённым уравнениям поверхности отклика для этих величин, описание получения которых имеется в разделе 3 данной статьи.

В четвёртом блоке производится стандартный расчёт состава бетона на 1 м^3 по методу абсолютных объёмов, а **в пятом** оценивается его себестоимость сложением произведений расхода всех компонентов с их стоимостью.

Построенная математическая модель (см. таблицу) представляет собой систему уравнений, которая охватывает все необходимые зависимости. Однако решить поставленную задачу оптимизации традиционным способом, используя полученную систему уравнений, – очень сложная задача, и её результатом будут громоздкие уравнения. Решение задачи оптимизации наиболее простым и понятным способом выполнено с помощью программного обеспечения Microsoft Excel, о чём изложено в следующем разделе.

5. Решение задачи оптимизации

Математическая модель (см. таблицу) встроена в среду Microsoft Excel, позволяющую выполнять решение задачи оптимизации. Напомним, что задача оптимизации состоит в том, чтобы найти минимальный по себестоимости состав бетона, который обеспечит требуемую прочность к заданному сроку для выбранных условий твердения бетона.

Строительные материалы и изделия

Математическая модель

Блок	Обозначение аргумента или функции	Область определения или функция		Ед. изм.	
		Для твердения в нормальных условиях	Для твердения после тепловой обработки		
1. Аргументы (вводные)	$R_{тр}$	5...50 (вводная для решения задачи оптимизации в Excel)		МПа	
	t	1...35	0,3 ... 35,0	сутки	
	Ц	280...440 (оптимизируется при поиске решения в Excel)		кг/м ³	
	Ш	24...76 (оптимизируется при поиске решения в Excel)		%	
2. Прочность бетона на сжатие	R_1	$6,829751764905702$ $- 0,000517006730659 \cdot Ш \cdot Ц$ $- 0,932142493150495 \cdot Ш$ $+ 0,128946698402912 \cdot Ц$ $+ 0,007780209626243 \cdot Ш^2$ $- 0,000070937373728 \cdot Ц^2$	$- 8,694469633069383$ $- 0,001347138940303 \cdot Ш \cdot Ц$ $+ 0,525614315658044 \cdot Ш$ $+ 0,062845448034098 \cdot Ц$ $- 0,002017301534563 \cdot Ш^2$ $+ 0,000054752697666 \cdot Ц^2$	Рис. 8	МПа
	R_{28}	$- 39,627197179875346$ $+ 0,000358995535253 \cdot Ш \cdot Ц$ $+ 0,962579814737453 \cdot Ш$ $+ 0,298033121827998 \cdot Ц$ $- 0,012686189560544 \cdot Ш^2$ $- 0,000345058495610 \cdot Ц^2$	$- 27,43164461231850$ $- 0,000457885250718 \cdot Ш \cdot Ц$ $+ 0,808314465236008 \cdot Ш$ $+ 0,227037729618043 \cdot Ц$ $- 0,007844261266597 \cdot Ш^2$ $- 0,000207386633559 \cdot Ц^2$	Рис. 8	
	R	$R_1 + (R_{28} - R_1) \log_{28} t$	$R_1 \cdot \left(\frac{R_{28}}{R_1}\right)^{\log_{28} t}$		
3. Параметры состава	r	$- 0,277607387236645 - 0,000004828719999 \cdot Ш \cdot Ц$ $- 0,004269526902738 \cdot Ш + 0,004131003224099 \cdot Ц$ $+ 0,000044283734992 \cdot Ш^2 - 0,000003837399816 \cdot Ц^2$		Рис. 2	-
	В/Ц	$1,694697062873770 + 0,000002371274354 \cdot Ш \cdot Ц$ $- 0,003277323225451 \cdot Ш - 0,005262365200316 \cdot Ц$ $+ 0,000016816383283 \cdot Ш^2 + 0,000005897924540 \cdot Ц^2$		Рис. 2	-
4. Расход компонентов	Щебень	$(1000 - ПЦ/\rho_{ПЦ} - МГДШ/\rho_{МГДШ} - \text{Вода}/\rho_{В} - СП/\rho_{СП}) \cdot (1-r) \cdot \rho_{Щ}^{(1)}$		кг/м ³	
	Отсев	$(1000 - ПЦ/\rho_{ПЦ} - МГДШ/\rho_{МГДШ} - \text{Вода}/\rho_{В} - СП/\rho_{СП}) \cdot r \cdot \rho_{О}^{(1)}$			
	ПЦ	$Ц \cdot (100-Ш)/100$			
	МГДШ	$Ц \cdot (Ш/100)$			
	Вода	$Ц \cdot (В/Ц)$			
	СП	$Ц \cdot (0,85/100)$			
5. Себестоимость С	$(\text{Щебень} \cdot C_{Щ} + \text{Отсев} \cdot C_{О} + ПЦ \cdot C_{ПЦ} + МГДШ \cdot C_{МГДШ}$ $+ \text{Вода} \cdot C_{В} + СП \cdot C_{СП}) / 1000^{(2)}$		Рис. 9	руб/м ³	

Примечания: 1. Плотности, г/см³: $\rho_{Щ} = 2,700$; $\rho_{О} = 2,685$; $\rho_{ПЦ} = 3,120$; $\rho_{МГДШ} = 2,940$; $\rho_{В} = 1,000$; $\rho_{СП} = 1,075$.
2. Стоимость всех компонентов приведена на рис. 9 в рублях за тонну.

В среде Excel созданы виджеты поиска решения для твердения бетона в нормальных условиях (рис. 4) и для твердения бетона после тепловой обработки (рис. 5), на которых слева располагается разработанная математическая модель (см. таблицу), а справа выполняется визуализация основных результатов.

Необходимые для вычислений значения плотности и себестоимости компонентов помещены на отдельных листах, а в формулах сделаны ссылки на соответствующие ячейки из этих листов. Ввод-

ные параметры (t , ρ , ρ_s) в виджетах можно менять и моментально получать результаты расчёта: состав бетона, его прочность и себестоимость. Оптимальный состав бетона будет получен после несложной процедуры поиска решения.

Для решения поставленной задачи оптимизации в виджете достаточно указать требуемую прочность (R_{tr}) и срок твердения (t). Далее необходимо установить и запустить надстройку «Поиск решения», затем ввести нужные параметры (рис. 6). В параметрах поиска решения нужно по-

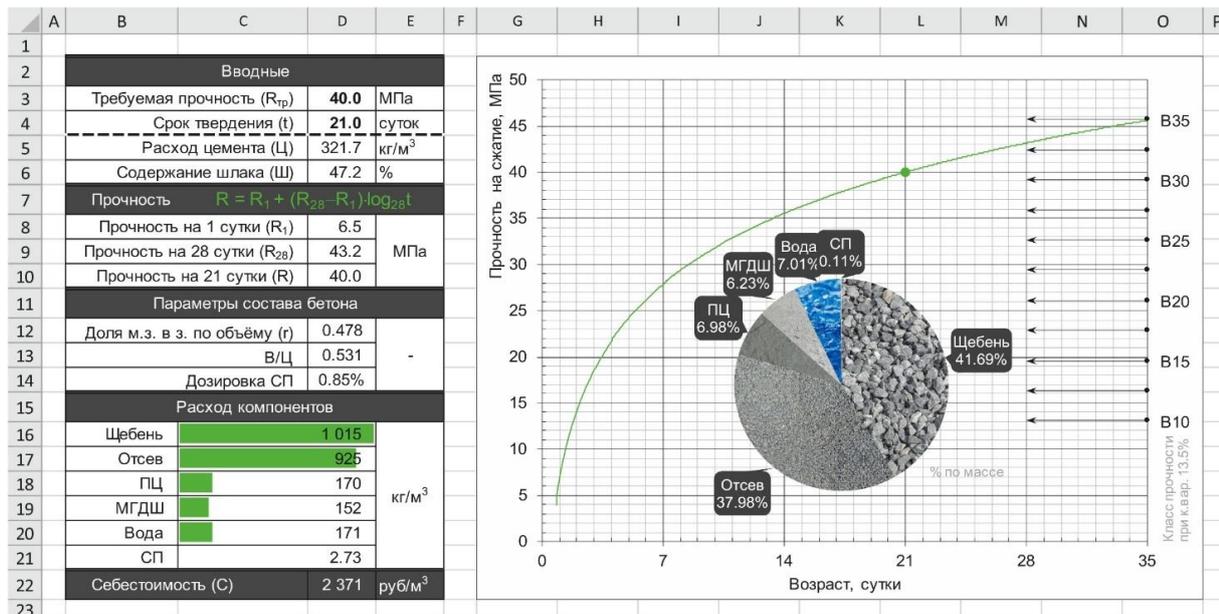


Рис. 4. Виджет поиска решения в среде Microsoft Excel для твердения бетона в нормальных условиях

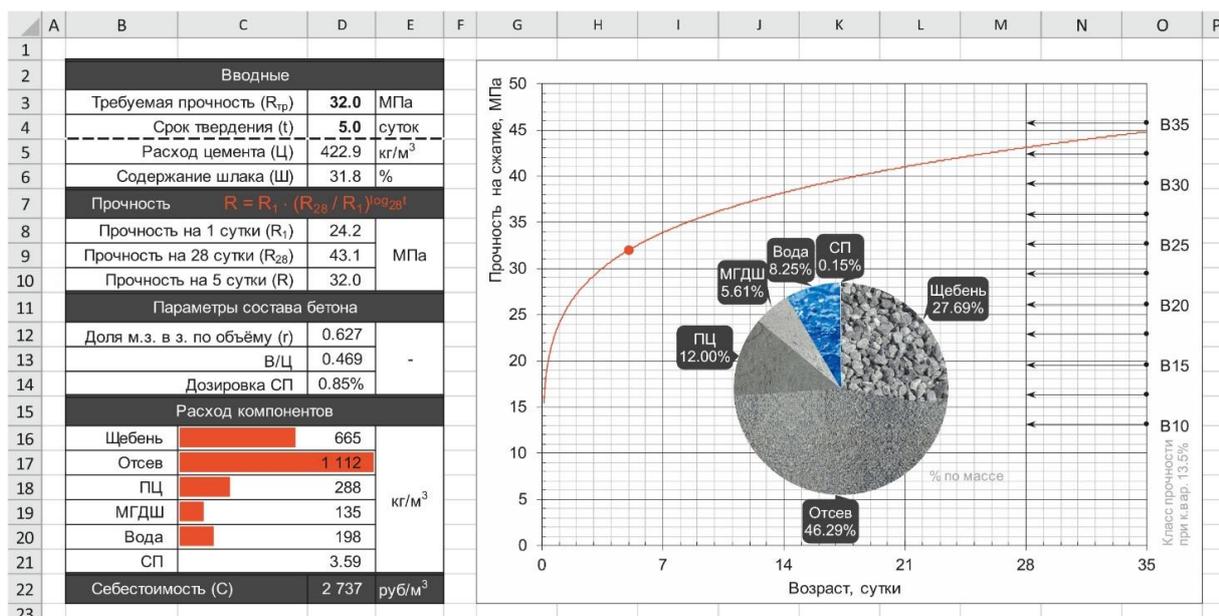


Рис. 5. Виджет поиска решения в среде Microsoft Excel для твердения бетона после тепловой обработки

Строительные материалы и изделия

ставить задачу: оптимизировать себестоимость (C) до минимума, изменяя расход цемента (Π) и содержание шлака в цементе (Ш), в соответствии с ограничениями: прочность бетона (R) в заданный срок твердения (t) должна быть больше или равна требуемой прочности ($R_{\text{тр}}$); расход цемента (Π) должен принимать значение от 280 до 440 кг/м³; содержание шлака в цементе (Ш) должно принимать значение от 24 до 76 %. Поиск решения поставленной нелинейной задачи рекомендуется производить по методу обобщенного понижающего градиента (ОПГ), который нужно выбрать в соответствующем поле.

После заполнения всех полей остаётся нажать кнопку «Найти решение» и получить результат прямо в виджете. В ячейках обновятся параметры Π и Ш , которые станут удовлетворять всем поставленным условиям (см. рис. 6), обновятся и все результаты, в том числе искомый состав бетона. В виджетах на рис. 4 и 5 приведены примеры поиска решения, на которых видно, что все условия выполнены. Таким образом, получаем минимальный по себестоимости состав бетона, обеспечивающий требуемую прочность в заданный срок для выбранных условий твердения.

6. Основные результаты и их анализ

Далее представлены графики поверхностей отклика по прочности на 2-е и 28-е сутки для НТ (рис. 7) и на 1-е и 28-е сутки для твердения после ТО (рис. 8). В рамках проработанного плана при НТ на 2-е сутки можно получить прочность от 6 до 29 МПа, на 28 суток – от 25 до 49 МПа; при твердении после ТО на 1-е сутки – от 13 до

25 МПа, на 28-е сутки – от 27 до 43 МПа. Полученной прочности и скорости твердения достаточно, чтобы отвечать требованиям производства практически всех видов изделий и конструкций. При загруженности завода менее 40 % и наличии времени на выполнение заказа выгоднее отказаться от тепловой обработки и выполнять распалубливание на 2-е сутки.

Важно отметить, что в марочном возрасте максимальную прочность имеют составы с содержанием молотого гранулированного доменного шлака в цементе в количестве 40...44 %, но такое количество шлака не является оптимальным: выгоднее составы с большим содержанием шлака и чуть более высоким расходом цемента. С учётом графика поверхности функции себестоимости (рис. 9) оптимальное содержание шлака в цементе находится в пределах 43...53 % в зависимости от требуемой прочности на 28-е сутки. Если необходимо обеспечить требуемую прочность в раннем возрасте бетона, то оптимальное содержание шлака в цементе будет принимать значение в диапазоне 24...43 %.

Как показывает практика, содержание шлака в цементе около 24 % практически не снижает прочность как в ранние, так и в поздние сроки твердения, поэтому принимать содержание шлака менее этой величины – нецелесообразно. Необходимо понимать и то, что бетонную смесь марки по подвижности П5 на данных заполнителях при расходе цемента менее 280 кг/м³ получить невозможно, поэтому для получения эффективных низкомарочных бетонов лучше повышать содержание шлака в цементе вплоть до 76 % в зависимости

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию:

До: Максимум Минимум Значения:

Изменяя ячейки переменных:

В соответствии с ограничениями:

-
-
-
-
-

Выберите метод решения:

Добавить

Изменить

Удалить

Параметры

Справка

Найти решение

Закрыть

Рис. 6. Диалоговое окно «Поиск решения» с заполненными параметрами в среде Microsoft Excel

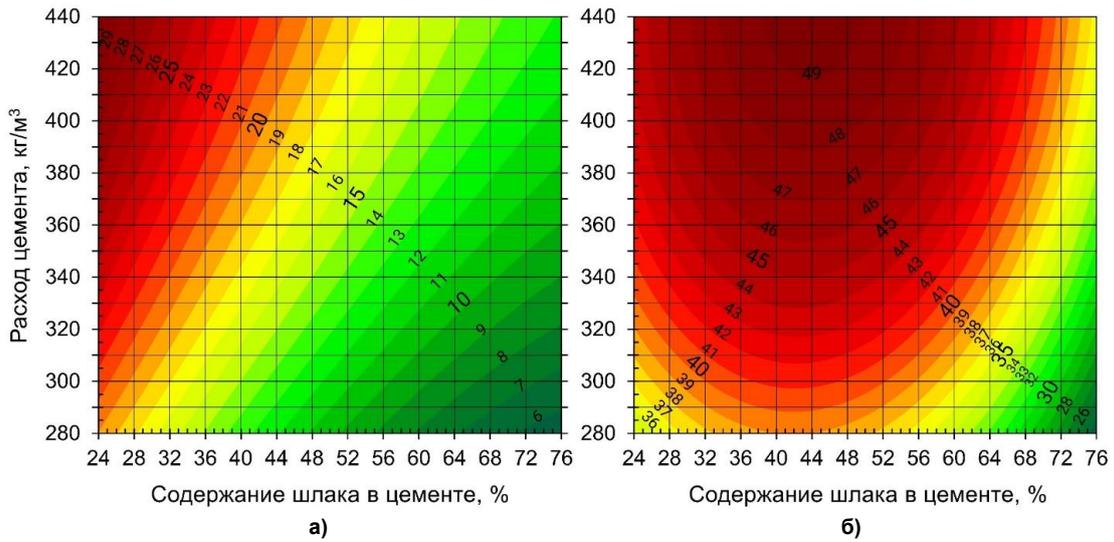


Рис. 7. Изолинии поверхностей для прочности (в МПа) на 2-е сутки (а) и 28-е сутки (б) при нормальных условиях твердения: 20 °С, φ = 95 %

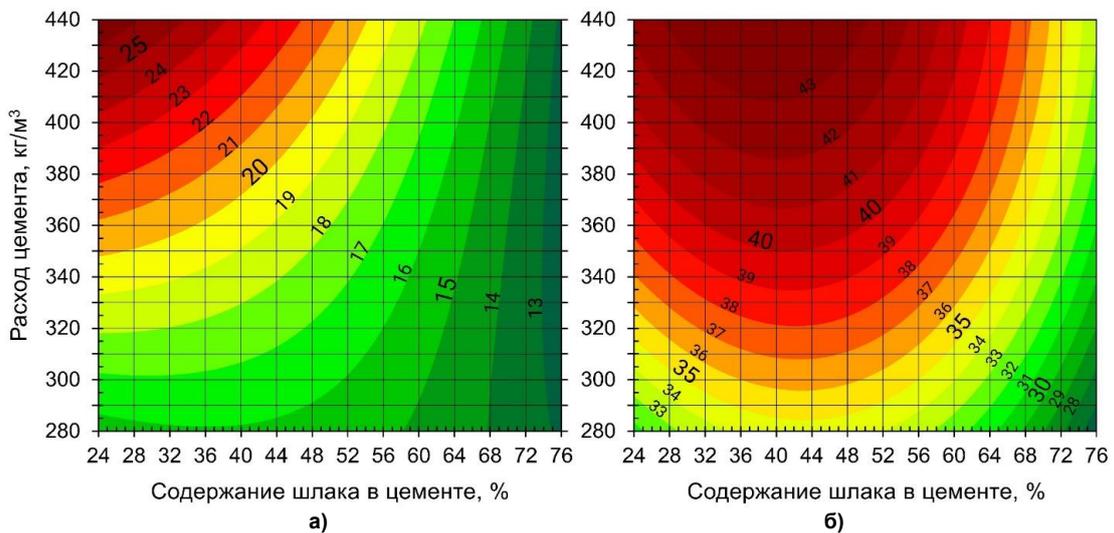


Рис. 8. Изолинии поверхностей для прочности (в МПа) на 1-е сутки (а) и 28-е сутки (б) при твердении после тепловой обработки: 7 ч, 70 °С

Компонент	Цена
Щебень фракции 5-20	700
Отсев дробления щебня	250
Портландцемент ЦЕМ I 42.5Н	4 300
Молотый гранулированный доменный шлак	2 500
Вода	22.5
Суперпластификатор	115 000

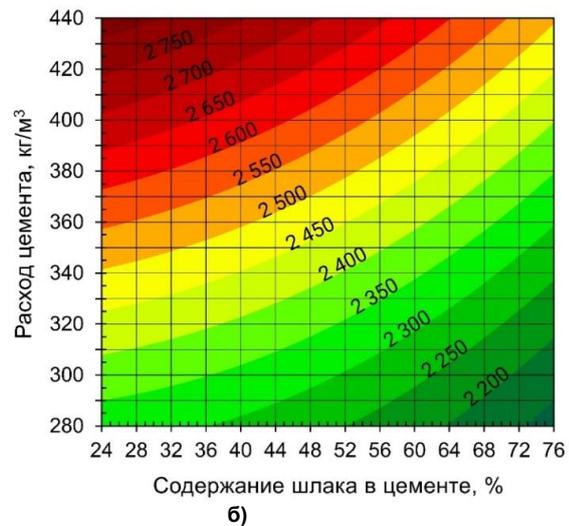


Рис. 9. Цены на компоненты, включая НДС и затраты на транспортировку, руб/т (а) и изолинии поверхности функции себестоимости бетона, руб/м³ (б)

от требуемой прочности. Эти особенности учитываются поставленными условиям задачи оптимизации в предыдущем разделе.

Оценка экономической эффективности выполнена с помощью построения графика поверхности функции себестоимости (см. рис. 9), из которого видно, что стоимость 1 м³ уплотнённой бетонной смеси (бетона) в рамках данного плана находится в диапазоне от 2150 до 2800 руб. В расчёте себестоимости приняты цены на компоненты, приведённые также на рис. 9.

Сопоставляя графики поверхностей прочности (см. рис. 7 и 8) и себестоимости (см. рис. 9), а также принимая во внимание, что все смеси в данном плане имеют высокую удобоукладываемость (марка бетонной смеси по подвижности П5), можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности разработки. Существенное повышение эффективности дополнительно приносит оптимизация состава бетона с учётом динамики набора его прочности.

Заключение

Представленная разработка позволяет назначать высокоэффективный состав бетона с условием обеспечения требуемой прочности к заданному сроку твердения. С помощью проработанной математической модели обеспечивается не только оперативность и точность принятия решений по корректировке и назначению состава бетона, но и чёткое понимание того, на каком составе выгоднее работать при текущих условиях производства, зависящих в первую очередь от объёма и сроков заказов предприятия, которые крайне нестабильны в современных экономических условиях. Математическую модель можно оперативно обновлять текущими данными с производства и удалять устаревшие, если качество сырья существенно изменилось.

Следует иметь в виду, что результаты подбора параметров составов и испытаний бетона на прочность применимы только при использовании указанных компонентов, хотя на других аналогичных заполнителях, портландцементе и молотом гранулированном доменном шлаке результаты должны быть близки к представленным. Изложенный в работе принцип построения математической модели, заключающийся в интеграции функции твердения, может быть применим для оптимизации составов бетонов с использованием любых компонентов.

Литература

1. Ozbay, E. *Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties – A Review* / E. Ozbay, M. Erdemir, H.I. Durmus // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 105. – P. 423–434.
2. Saranya, P. *Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review* / P. Saranya, P. Nagarajan, A.P. Shashikala // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 330, № 1. – P. 012057, 1–5.
3. Ozturk, O. *Mechanical and Workability Evaluation of Self-Compacting Concrete Incorporating High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag* / O. Ozturk, B. Dalgic, U.S. Keskin // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 22, № 2. – P. 145–148.
4. Tang, K. *Early-age Heat Development in GGBS Concrete Structures* / K. Tang, S. Millard, G. Beattie // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*. – 2015. – Vol. 168, № 8. – P. 541–553.
5. Osborne, G.J. *Durability of Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete* / G.J. Osborne // *Cement and Concrete Composites*. – 1999. – Vol. 21, № 1. – P. 11–21.
6. *Performance of Reinforced Concrete Beams Cast with Different Percentages of GGBS Replacement to Cement* / R.A. Hawileh, J.A. Abdalla, F. Fardmanesh et al. // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 17, № 3. – P. 511–519.
7. Aghaeipour, A. *Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) on RCCP durability* / A. Aghaeipour, M. Madhkhani // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 141. – P. 533–541.
8. Xu, G. *Effect of Steel Slag and Granulated Blast-furnace Slag on the Mechanical Strength and Pore Structure of Cement Composites* / G. Xu, X. He, Y. He // *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. – 2018. – Vol. 33, № 5. – P. 1186–1192.
9. *Air Void System and Frost-salt Scaling of Concrete Containing Slag-Blended Cement* / Z. Giergiecny, M.A. Glinicki, M. Sokolowski, M. Zielinski // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, № 6. – P. 2451–2456.
10. *GGBS and Fly Ash Effects on Compressive Strength by Partial Replacement of Cement Concrete* / A.A. Phul, M.J. Memon, S.N.R. Shah, A.R. Sandhu // *Civil Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 5, № 4. – P. 913–921.
11. *Samad, S. Strength Development Characteristics of Concrete Produced with Blended Cement Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) under Various Curing Conditions* / S. Samad, A. Shah, M.C. Limbachiya // *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. – 2017. – Vol. 42, № 7. – P. 1203–1213.
12. *Rao, S.K. Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete with GGBS* / S.K. Rao, P. Sravana, T.C. Rao // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 114. – P. 925–933.
13. *Richardson, I.G. Microstructure and Microanalysis of Hardened Cement Pastes Involving Ground Granulated Blast-furnace Slag* / I.G. Richardson, G.W. Groves // *Journal of Materials Science*. – 1992. – Vol. 27, № 22. – P. 6204–6212.
14. *Lukowski, P. Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid*

and Sulphate Environment / P. Lukowski, A. Salih // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 108. – P. 47–54.

15. Ground Granulated Blast Furnace Slag Effect on the Durability of Ternary Cementitious System Exposed to Combined Attack of Chloride and Sulfate / G. Li, A. Zhang, Z. Song et al. // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 158. – P. 640–648.

16. Иванов, И.М. Бетон на основе шлакопортландцемента для дорожных и аэродромных покрытий / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар, А.А. Кирсанова // *Цемент и его применение*. – 2019. – № 2. – С. 96–102.

17. Ключевые показатели цементной и строительной отраслей России за 2019 год. – <https://jcement.ru/statistic/klyuchevye-pokazateli-tsementnoy-i-stroitelnoy-otrasley-rossii-za-2019-god/> (дата обращения: 9 мая 2020).

18. Pizon, J. Influence of Hardening Accelerating Admixtures on Properties of Cement with Ground Granulated Blast Furnace Slag / J. Pizon, P. Miera,

V. Lazniewska-Piekarczyk // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 161. – P. 1070–1075.

19. Трофимов, Б.Я. Молотый доменный гранулированный шлак и способы его активации / Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // *Труды международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» 2015. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 146–152.*

20. ТУ 38.32.22-012-99126491-2017. Добавка активная минеральная для производства бетонов, растворов и сухих строительных смесей Green-Cemts GGBS-450 (шлак доменный гранулированный молотый). – Челябинск: ООО Мечел-Материалы, 2017. – 25 с.

21. Хицков, А.А. Влияние глинистых частиц различных песков на эффективность поликарбонатных суперпластификаторов и свойства цементного камня / А.А. Хицков, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар // *Строительство и реконструкция*. – 2018. – № 6. – С. 102–116.

Иванов Илья Михайлович, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ivanov.im@bk.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramar-l@mail.ru

Поступила в редакцию 3 сентября 2020 г.

MSC 93A30, 97M50

DOI: 10.14529/build200404

MATHEMATICAL MODEL FOR ASSIGNING HIGH-EFFECTIVE CONCRETE MIX USING GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

I.M. Ivanov, ivanov.im@bk.ru

L.Ya. Kramar, kramar-l@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The selection of materials that increase the efficiency of concrete is made, an approach to the optimal use of ground granulated blast-furnace slag is proposed. In order to achieve a high economic effect, the concrete composition is optimized considering the dynamics of its strength set, for which simplified equations of concrete hardening, which are the core of the developed mathematical model, are derived. Quality control of accepted materials, testing of concrete mixtures for flowability and strength of concrete samples are carried out in accordance with the current standards of Russia. Processing of the obtained data is performed in Microsoft Excel software, and obtaining equations and graphs of response surfaces is carried out in StatSoft STATISTICA. A planned experiment is carried out, in which the variable factors are cement consumption (from 280 to 440 kg per cubic meter of concrete) and slag content in cement (from 24 to 76 %). At each point of the plan, an experimental selection of the parameters of the concrete composition is made, the equations and graphs of the response surfaces for these parameters are obtained. Tests of concrete specimens for strength under normal hardening conditions were aimed to be performed in the 3rd, 7th, and 28th days, and during hardening after heat treatment (7 hours, 70 °C) – in the 1st, 7th and 28th days. The hardening equations are determined from the average strength values at the actual test times for all

the compositions obtained, from which the strength is calculated at exactly in the 1st and 28th days for all points of the plan, and then the equations for the strength response surfaces are obtained. The latter are necessary for calculating the strength of the concrete by a set time using previously derived simplified hardening equations. These and other obtained equations are combined into a mathematical model consisting of blocks: input parameters, strength calculation, calculation of concrete composition parameters, calculation of component consumption and cost estimation. The mathematical model presented in the article, through the developed widgets in Excel, allows to quickly and accurately solve the optimization problem – to assign a concrete mix proportion for the selected hardening conditions with a minimum cost and a condition for ensuring the required strength by the specified time.

Keywords: mathematical model, optimization of concrete mix, high-effective concrete, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), portland cement (PC or CEM I), portland blast-furnace slag cement (PBSC or CEM III), artificial sand.

References

1. Ozbay E., Erdemir M., Durmus H.I. [Utilization and Efficiency of Ground Granulated Blast Furnace Slag on Concrete Properties – A Review]. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 105, pp. 423–434.
2. Saranya P., Nagarajan P., Shashikala A.P. [Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 330, no. 1, pp. 012057, 1–5.
3. Ozturk O., Dalgic B., Keskin U.S. [Mechanical and Workability Evaluation of Self-Compacting Concrete Incorporating High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag]. *Cement Wapno Beton*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 145–148.
4. Tang K., Millard S., Beattie G. [Early-Age Heat Development in GGBS Concrete Structures]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2015, vol. 168, no. 8, pp. 541–553.
5. Osborne G.J. [Durability of Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete]. *Cement and Concrete Composites*, 1999, vol. 21, no. 1, pp. 11–21.
6. Hawileh R.A., Abdalla J.A., Fardmanesh F., Shahsana P., Khalili A. [Performance of Reinforced Concrete Beams Cast with Different Percentages of GGBS Replacement to Cement]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 511–519.
7. Aghaeipour A., Madhkhan M. [Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) on RCCP durability]. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 141, pp. 533–541.
8. Xu G. He X., He Y. [Effect of Steel Slag and Granulated Blast-furnace Slag on the Mechanical Strength and Pore Structure of Cement Composites]. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 2018, vol. 33, no. 5, pp. 1186–1192.
9. Giergiczny Z., Glinicki M.A., Sokołowski M., Zielinski M. [Air Void System and Frost-salt Scaling of Concrete Containing Slag-Blended Cement]. *Construction and Building Materials*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 2451–2456.
10. Phul A.A., Memon M.J., Shah S.N.R., Sandhu A.R. [GGBS and Fly Ash Effects on Compressive Strength by Partial Replacement of Cement Concrete]. *Civil Engineering Journal*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 913–921.
11. Samad S., Shah A., Limbachiya M.C. [Strength Development Characteristics of Concrete Produced with Blended Cement Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) under Various Curing Conditions]. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2017, vol. 42, no. 7, pp. 1203–1213.
12. Rao S.K., Sravana P., Rao T.C. [Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete with GGBS]. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 114, pp. 925–933.
13. Richardson I.G., Groves G.W. [Microstructure and Microanalysis of Hardened Cement Pastes Involving Ground Granulated Blast-furnace Slag]. *Journal of Materials Science*, 1992, vol. 27, no. 22, pp. 6204–6212.
14. Lukowski P., Salih A. [Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment]. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 108, pp. 47–54.
15. Li G., Zhang A., Song Z., Liu S., Zhang J. [Ground Granulated Blast Furnace Slag Effect on the Durability of Ternary Cementitious System Exposed to Combined Attack of Chloride and Sulfate]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 158, pp. 640–648.
16. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Kirsanova A.A. [Concrete Based on Portland Blast-furnace Slag Cement for Road and Aerodrome Pavements]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its Application], 2019, no. 2, pp. 96–102. (in Russ.)
17. *Klyuchevyye pokazateli tsementnoy i stroitel'noy otrasley Rossii za 2019 god* [Key Indicators of the Cement and Construction Industries in Russia in 2019]. Available at: <https://jcement.ru/statistic/klyuchevyye-pokazateli-tsementnoy-i-stroitelnoy-otrasley-rossii-za-2019-god/> (accessed 09 may 2020).
18. Pizon J., Miera P., Lazniewska-Piekarczyk B. [Influence of Hardening Accelerating Admixtures on Properties of Cement with Ground Granulated Blast Furnace Slag]. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 161, pp. 1070–1075.

19. Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. [Ground Granulated Blast-furnace Slag and its Activation Methods]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Prom-Inzhiniring" 2015* [Proc. of the International Conference on Industrial Engineering 2015]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015, pp. 146–152. (in Russ.)

20. TU 38.32.22-012-99126491-2017. [Active Mineral Admixtures for the Production of Concretes, Mortars and Dry Building Mixtures GreenCems GGBS-450 (Ground Granulated Blast-furnace Slag)]. Chelyabinsk, Mechel-Materials LLC Publ., 2017. 25 p. (in Russ.)

21. Khitskov A.A., Ivanov I.M., Kramar L.Ya. [Influence of Clay Particles of Various Sands on the Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers and the Properties of Cement Stone]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction], 2018, no. 6, pp. 102–116. (in Russ.)

Received 3 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Иванов, И.М. Математическая модель для назначения высокоэффективного состава бетона с использованием молотого гранулированного доменного шлака / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 28–41. DOI: 10.14529/build200404

FOR CITATION

Ivanov I.M., Kramar L.Ya. Mathematical Model for Assigning High-Effective Concrete Mix Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 28–41. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200404
