

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ НА СТАДИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ. ЧАСТЬ II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

РО. РЕЗАЕВ, канд. физ. мат. наук, генеральный директор ООО «Проектирование материалов», Москва, Россия; доцент ТПУ, г. Томск, Россия; науч. сотр. IFW Dresden, г. Дрезден, Германия;
А.А. Дмитриев, главный технолог ООО «Проектирование материалов», г. Москва, Россия;

Ключевые слова: смесительное устройство, автоматизация, контроль качества, бетонный завод

Keywords: mixing device, automation, quality control, concrete plant



В статье обсуждается постановка проблемы контроля качества бетонной смеси в процессе ее перемешивания и приводятся необходимые авторские экспериментальные данные. Актуальность не вызывает сомнений, поскольку успешное решение данного вопроса позволит значительно снизить брак выпускаемой продукции и уменьшить себестоимость куба бетонной смеси. Представленные в работе данные отражают уровень сложностей, стоящих на пути разработки методов анализа профиля потребляемой миксером мощности. Основная сложность – это случайная природа данного сигнала. В настоящей статье приводятся рассуждения, в каком направлении следует осуществлять разработку данных методов. Статья является второй частью серии обзорных работ в этом направлении.

The article discusses the formulation of concrete mixture quality control issue during its mixing and provides the necessary author's experimental data. The relevance of this issue is beyond doubt, since a successful solution to this problem will significantly reduce defective products and reduce the cost of a cube of concrete mixture. The data presented in the work reflects the level of difficulties that stand in the way of developing methods for analyzing the profile of power consumed by a mixer. The main problem is the random nature of this signal. The article discusses the direction in which these methods should be developed. The article is the second part of a series of review works in this direction.

Введение

Сложно переоценить степень влияния процесса перемешивания компонентов бетонной смеси на ее показатели качества. При этом методики оценки качества самого процесса перемешивания относительно слабо представлены в актуальной выборке периодических изданий. Еще слабее раскрыта тематика возможных способов характеристики бетонной смеси по данным параметров ее перемешивания. Между тем оба вопроса имеют большое практическое значение. Стандартно утвержденный на предприятии режим работы смесительного устройства (СУ) не учитывает ни характеристик загружаемых материалов, ни расход этих материалов на единицу объема. Очевидно, что при одном и том же режиме перемешивания смесей, содержащих различное количество песка, будет достигнута разная степень гомогенности. Смесям с большей долей песка потребуются более длительное и тщательное перемешивание, чтобы однородно распределить его мелкие частицы по объему смеси.

Анализ литературных данных и различных коммерческих предложений от поставщиков систем автоматического управления технологическими процессами показывает, что проблема контроля степени однородности бетонной смеси в процессе ее перемешивания в полной мере на сегодняшний день не решена. Длительность режимов перемешивания определяется часто по показаниям амперметра, измеряющего силу тока в цепи и отражающего в некотором приближении нагрузку на вал смесителя – при выходе этого показателя на стационарное среднее значение по умолчанию считается, что смесь перемешалась достаточно хорошо. Такой подход неверный – в качестве контраргумента достаточно предложить таким способом определить однородность перемешивания сухих смесей. При фиксированном объеме перемешиваемой сухой смеси стационарные значения силы тока будут достигнуты достаточно быстро, при этом смесь будет неоднородна в плане распределения компонентов сыпучих материалов по объему. Установка каких-либо дополнительных датчиков в СУ, в свою очередь, усложняет и удорожает технологический процесс, но проблему контроля качества смеси в

большинстве случаев не решает по ряду причин. Задача характеристики бетонной смеси тесно связана с вопросом контроля однородности перемешивания. Такая величина как, например, пластическая вязкость, примененная к описанию свойств бетонной смеси, характеризуется значительным разбросом значений, связанных в том числе с недостаточной однородностью бетонной смеси. При этом если вместо вязкости анализировать параметры переходных процессов, возникающих при контролируемых сменах режимов перемешивания, можно получить более стабильные характеристики, связанные с реологическими свойствами бетонных смесей. Физический принцип проводимых измерений в данном случае основан на контролируемом механическом воздействии лопаток СУ на перемешиваемую среду с последующим анализом отклика этой среды на воздействие. Если геометрия СУ задана, то при должной калибровке отклик на воздействие будет зависеть в основном от реологических свойств смеси и, анализируя данные от различных режимов перемешивания, можно будет определить корреляции между желаемыми свойствами смесей (например, расслаиваемость, перекачиваемость, водоотделение и т.д.) и параметрами отклика.

Близкая по сути задача мониторинга качества смеси в процессе перемешивания возникает при производстве изделий из резины. Расплавы каучуков представляют собой высоковязкие неньютоновские жидкости, а основные ингредиенты – армирующие наполнители, такие как сажа или кремнезем, – обладают поверхностной активностью, препятствующей диспергированию в матрице каучука. В результате, наполнители плохо перемешиваются, формируя небольшие агломерационные сгустки, объем которых корректируется в сторону уменьшения либо повышением температуры (процесс инерционный, медленный, поэтому не распространен на практике), либо подбором режима перемешивания (зачастую просто увеличивая длительность перемешивания). В свою очередь, подбор и определение оптимального режима перемешивания сталкивается с проблемой стабильности свойств сырьевых материалов – каучука, армирующий наполнителей и т.д. Сложившаяся ситуация обусловила разви-

тие различных идей мониторинга качества производимых изделий из резины еще на стадии перемешивания. В частности, в работах [1-2] предложены схемы контроля перемешивания каучуковой матрицы с армирующими наполнителями на основе данных о крутящем моменте вала миксера, температуры смеси и потребляемой в процессе перемешивания мощности. Предложенная схема была реализована на базе нейронных сетей [1] и контрольных диаграмм (карт) [2]. В контексте производства бетонных смесей практический интерес могут представлять системы контроля качества, построенные на базе анализа данных о потребляемой мощности миксером с привлечением, в тех случаях, где это возможно, дополнительной информации о влажности, гранулометрии заполнителей и т.д.

Данная работа является второй частью обзорной серии по анализу возможностей контроля качества бетонной смеси на основе информации о потребляемой смесительным устройством энергии с применением современных методов анализа данных. В статье представлен анализ типовой зависимости потребляемой СУ мощности от времени с интерпретацией характерных участков в контексте решения проблем контроля качества.

Типовая зависимость от времени потребляемой в процессе перемешивания мощности

На рис. 1 представлена типовая (схематическая) зависимость потребляемой мощности СУ от времени в одном цикле перемешивания. Можно выделить несколько характерных стадий [3]. Сухое перемешивание (участок кривой 1 на рис. 1) характеризуется относительно постоянным энергопотреблением и малыми флуктуациями мощности. Введение в миксер жидкости (участок 2 на рис. 1) вызывает резкое возрастание как потребляемой мощности, так и ее флуктуаций. Увеличение мощности обусловлено появлением значительных сил сцепления между твердыми частицами посредством поверхностного натяжения. Частицы обволакиваются пленкой воды, благодаря которой эти силы и проявляются.

Флуктуации мощности связаны с неравномерностью по объему смачивания поверхности частиц. На этом этапе перемешивания формируются различные по размеру

увлажненные «комки» сыпучих материалов. В дальнейшем происходит небольшая стабилизация потребляемой мощности и флуктуаций на уровне, превышающем эти значения на этапе сухого перемешивания. На участке 3 (рис. 1) увлажненные «комки» начинают объединяться, происходит возрастание увлажненной поверхности частиц, потребление мощности проходит через максимальное значение и далее начинает уменьшаться, смесь становится пластичной. При этом, однако, флуктуации мощности относительно линии тренда остаются значительными. Последующее перемешивание увеличивает степень гомогенности смеси, потребление мощности уменьшается и выходит на стационарные значения, линия тренда описывается медленно спадающим законом, флуктуации мощности относительно линии тренда уменьшаются и также выходят на стационарные характеристики (участок 4, рис. 1).

Различные участки типовой зависимости в частных случаях будут проявлены в различной мере, в зависимости от конкретного состава бетона, однако качественно данный тип кривой можно считать шаблоном для данного протокола (сначала сухие материалы с последующим добавлением воды) перемешивания. Описать данную кривую одной аналитической функциональной зависимостью с конечным и небольшим набором параметров представляется маловероятным. С этой целью более перспективным подходом является описание отдельных участков типовой зависимости. Так, например, практический интерес может представлять участок с момента времени добавления воды до достижения максимального значения мощности. В этот период доминирующим является процесс перераспределения влаги по всему объему смеси с образованием пластичной массы. Работа в термодинамическом смысле тратится на разрывы связей между твердыми частицами сцепленными силами поверхностного натяжения и на физическое перемещение небольших масс смеси по объему. Второй важный участок зависимости – спадающая часть кривой мощности после прохождения точки максимума. На этом участке происходит гомогенизация смеси, критерием качества которой часто считают стационарное значение тренда мощности [3]. Процесс перемешивания с точки зре-

ния механики сред в грубом приближении происходит следующим образом. Лопатка смесителя оказывает силу на некоторый объем смеси, который под действием этой силы начинает сдвигаться относительно соседних объемов материала и при таком смещении испытывает силу трения со стороны неподвижных слоев. Эти силы зависят от удельной поверхности контактирующих слоев, связности и вязкости смеси, предела текучести смеси, объема воздуховлечения и т.д. Эти же свойства в свою очередь от конкретного состава смеси, что в итоге позволяет говорить о некоторой замкнутой связи состав-процесс перемешивания-свойства смеси. Поскольку аналитический вид такой взаимосвязи установить на сегодняшний день крайне сложно, подходящим инструментом для ее описания могут являться корреляционные модели [4].

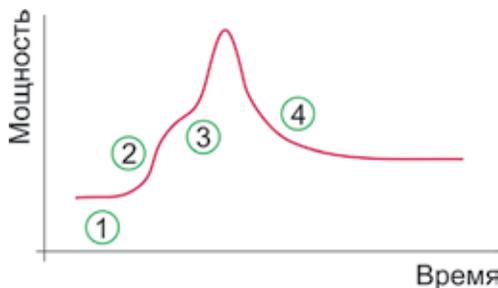


Рис. 1. Схематическая зависимость потребляемой смесительным устройством мощности от времени. Участки 1-4 характеризуют различные этапы перемешивания.

Экспериментальная программа

На сегодняшний день существует большой спектр различных возможностей для сбора и анализа зависимости мощности перемешивания бетонной смеси от времени. Используемая в данной работе измерительная схема включает в себя универсальный измеритель параметров электрических сетей WB-MAP3E с интерфейсом RS-485

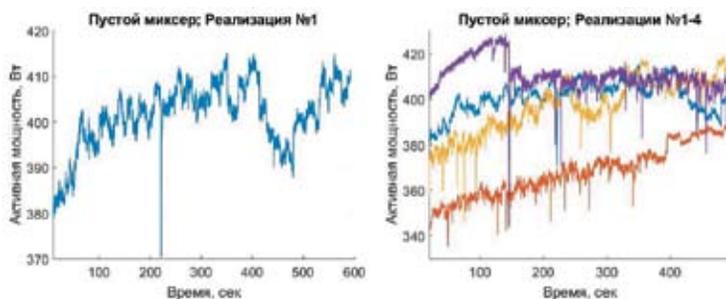


Рис. 2. Мощность, потребляемая пустым миксером, как функция времени. Слева — единичное измерение, справа — повтор 4-х измерений

на основе микросхемы Atmel M90E32AS и контроллер Wiren Board 7 для первичной обработки данных. Мощность оценивается как среднее за 30 полупериодов.

На первом этапе было проведено измерение мощности пустого лабораторного миксера, результат которого представлен на рис. 2. Слева 1 реализация, справа — повтор измерений. Из визуального анализа данных можно отметить, что структура единичного измерения отражает реализацию некоторого случайного процесса, при этом ни среднее значение, ни флуктуации этого процесса не остаются постоянными от реализации к реализации, как видно из правой панели рисунка 2. На начальном временном этапе потребляемая мощность отражает небольшой растущий тренд, который, по-видимому, связан с особенностями схемы питания и режима работы миксера. Информация о профиле потребляемой мощности пустым миксером имеет важное значение, поскольку в дальнейшем позволит отделить в результирующем сигнале ту его часть, которая имеет отношение непосредственно к смеси. По реализациям 1-4 (правая панель, рис 1) можно оценить вариативности среднего значения и его дисперсии в грубом приближении (без учета трендовой составляющей) — [368,2 ±11,2; 398,8 ±13,0; 409,8 ±6,7; 401,6 ±7,0] Вт. Из представленных данных следует, что среднее значение потребляемой миксером мощности варьируется в пределах 10% от реализации к реализации. Как будет показано далее, эта величина колебаний сравнима с потребляемой мощностью загруженного смеси миксера, следовательно, в каждом измерении мощности миксера со смесью должны присутствовать также и данные, отражающие потребление мощности пустого миксера в данной конкретной реализации. При этом загрузку материалов необходимо осуществлять без остановки миксера.

Для оценки профиля потребления мощности миксером, загруженным бетонной смесью, было реализовано 3 состава бетона, отличающихся между собой отношением доли песка в щебне (табл. 1), 4-й состав являлся повторением 1-го.

Результирующий профиль потребления мощности для составов из табл. 1 представлен на рис. 3. Резкий пик в диапазоне времен от 200 до 300 секунд, соответствующий пику на рис. 1, отражает участок, на котором

была добавлена вода. Отметим два важных на текущем этапе исследований момента – профиль потребления мощности содержит значительную компоненту шума при этом можно условно выделить 2 масштаба шума. Первый масштаб, очевидный, представлен высокочастотной компонентой сигнала и визуально выглядит как флуктуации относительно некоторого тренда. Второй масштаб, менее очевидный, но имеющий также случайную природу – низкочастотный профиль сигнала, описывающий трендовую составляющую. Несмотря на то, что эта компонента может быть описана как обычная регулярная функция, параметры, задающие класс этой функций, являются случайными. Этот вывод напрямую следует из сравнения профиля потребления мощности для составов №1 и №4 (см. рис. 4). В реальности эти составы представлены одним и тем же расходом материалов, однако, как видно из данных, – трендовая компонента профиля потребления мощности отличается между ними значительно. Поскольку все исходные данные оставались неизменными, то результат определяется случайной величиной. Следовательно, анализ профиля необходимо выполнять методами стохастического исчисления, которые будут разработаны и представлены в последующих работах.

Стоит отметить одну интересную деталь, касающуюся профиля мощности для составов №1 и №4 (рис. 4). Начало графика соответствует уровню пустого миксера при этом видно, что в случае состава №4 уровень пустого миксера примерно на величину 50–60 Вт превышает уровень пустого миксера в случае данных состава №1. При этом мощность, потребляемая на этапе гомогенного перемешивания (данные по мощности на графиках лежат в окрестности 500 сек), отличается уже не так резко. Итоговая осадка конуса также не показывает значительного расхождения между этими составами (табл. 1).

Одной из целей анализа профиля потребляемой мощности является поиск корреляций параметров этого профиля с реологическими свойствами бетонной смеси, выраженной, например, с помощью технологического показателя – осадка конуса. Для достижения этой цели необходимо выявлять количественные показатели профиля, в некотором смысле стабильные для заданного состава в той мере, насколько

ТАБЛИЦА 1. СОСТАВЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОФИЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

№	Щебень, кг	Песок, кг	Цемент, кг	Вода, л	Осадка конуса, см
1	1000	820	350	200	7,0
2	1170	650			13,0
3	800	1020			4,5
4	1000	820			7,5

стабилен интересующий показатель свойства смеси, а также показывающие высокую корреляцию с этим показателем. Средние значения мощности, даже по различным участкам профиля, не удовлетворяют этим критериям в случае осадки конуса. Сдвиг уровня пустого миксера указывает на то, что поиск способов характеристики профиля мощности необходимо выполнять через нормированные величины. Данные можно калибровать либо аддитивным способом, либо мультипликативным. В первом случае, уровень потребления мощности пустого миксера считается нулевой меткой, относительно которой далее строятся все рассуждения. Во втором случае нормировка осуществляется посредством операций деления/умножения на соответствующие усредненные значения мощности потребления пустого миксера. Помимо указанной нормировки, необходимо также привести данные по мощности на 1 л объема бетонной смеси, тем самым убрав зависимость от объемного фактора.

Полезным с практической точки зрения может оказаться также интегральный показатель профиля мощности – количество «поглощенной» энергии в процессе пере-

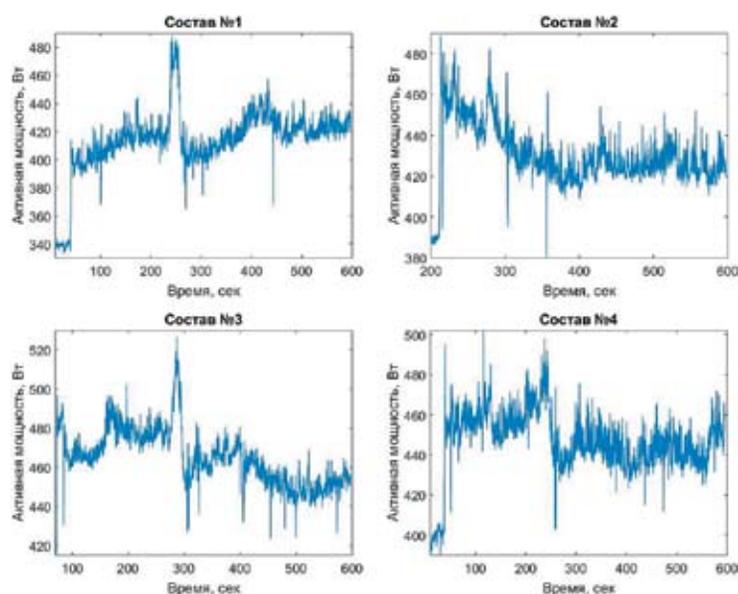


Рис. 3. Профиль потребления мощности миксером при различных составах (табл. 1)

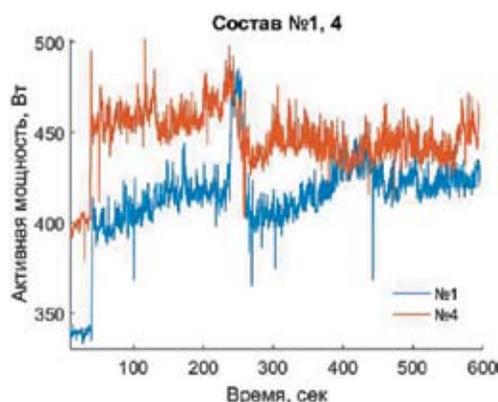


Рис. 4. Профиль потребления мощности миксером составов №1 и №4 (один и тот же состав, реализованный 2 раза)

мешивания, за вычетом уровня мощности пустого миксера. Данная характеристика представляет собой интеграл, вычисленный по систематической компоненте профиля мощности. По итогам вышесказанного, обозначенную программу разработки инструментов анализа профиля мощности потребления миксером можно реализовать на методологической базе, представленной в работе [4] с той особенностью, что объектом исследования в данном случае является такое специфическое свойство бетонной смеси, как порожденный отклик в профиле потребляемой мощности в процессе перемешивания.

Заключение

В работе проведен анализ современного состояния возможностей контроля качес-

тва бетонной смеси на этапе ее перемешивания на базе информации о потребляемой смесительным устройством мощности как функции времени. Существующие в этом направлении подходы показывают перспективность данной идеи, подтвержденной рядом практических результатов. При этом единой методической базы для использования данной группы методов на практике не существует. Однако на эту роль может претендовать метод построения вероятностных моделей. Представленные в работе экспериментальные данные указывают для этого направление, в котором необходимо осуществлять дальнейшие исследования.

Библиографический список

1. M. Bratina, Z. Susteric, B. Ster, U. Lotric, A. Dobnikar, *Predictive control of Rubber mixing process based on neural network models*. – *KGK rubberpoint, Maschinen und anlagen*, 2009, p. 378-382.
2. B. Klie, S. Teich, E. Haberstroh, U. Giese, *New method for evaluating rubber mixing quality by means of alternative representation of the fingerprint chart*. – *KGK rubberpoint, Maschinen und anlagen*, 2015, p. 31-38.
3. B. Cazaciu, N. Roquet, *Concrete mixing kinetics by means of power measurement*. – *Cement and Concrete Research*, 39, 2009, p. 182-194.
4. Р.О. Резаев, А.А. Дмитриев, Д.В. Чернявский, *Применение вероятностных подходов для построения моделей «состав-свойство»*, 4-5, 2022, с. 25-37.