

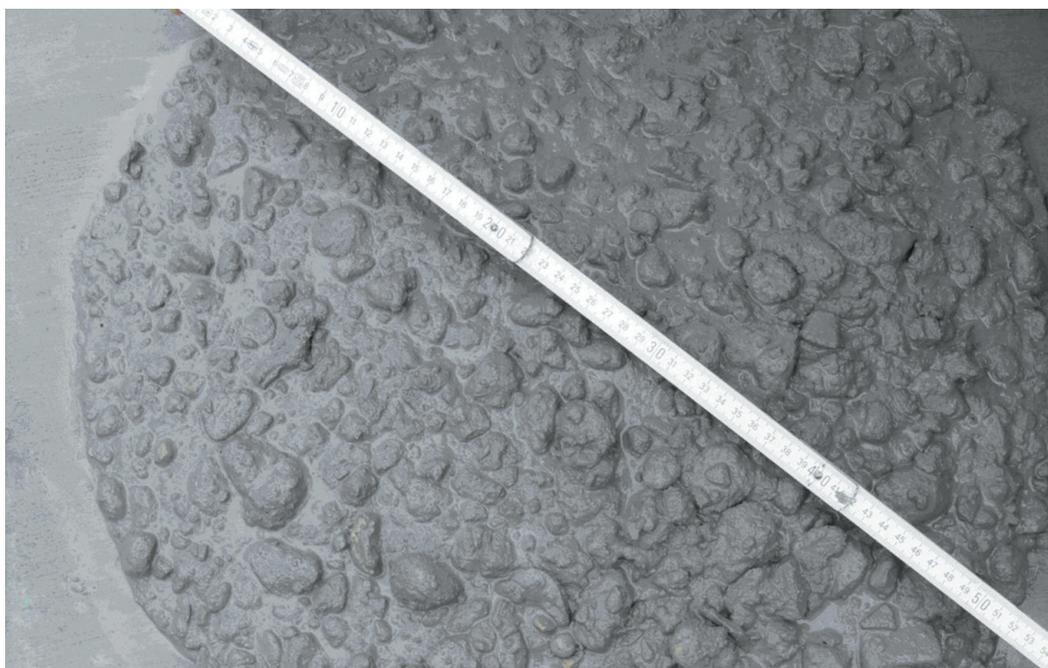
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ НА СТАДИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ. ЧАСТЬ III. ПРОБЛЕМА КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ОСАДКОЙ КОНУСА И МОЩНОСТЬЮ СМЕСИТЕЛЯ

РО. РЕЗАЕВ, канд. физ. мат. наук, генеральный директор ООО «Проектирование материалов», г. Москва; 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 проблема построения корреляционной модели между осадкой конуса бетонной смеси и различными характеристиками потребляемой смесителем мощности. Приведены экспериментальные данные, позволяющие оценить статистические свойства различных участков профиля мощности и сделать выводы о возможности построения подобной корреляционной модели. В частности, показано, что величина среднеквадратического отклонения уровня мощности заведомо превышает изменение уровня мощности в случае изменения осадки конуса бетонной смеси с 1-2 см до 20 см. При этом, однако, сохраняется возможность построения корреляционной модели, если принять во внимание относительные изменения мощности в пределах одного профиля.

The article deals with the issue of the correlation model development between the slump of a concrete mix and various characteristics of the mixer power. Experimental data are presented that allow us to estimate the statistical properties of various segments of the power profile and draw conclusions about the possibility of the existence of such a correlation model. In particular, it is shown that the value of the standard deviation of the power level substantially exceeds the change in the power level in the case of a change in the slump from 1-2 cm to 20 cm. At the same time, it is possible to construct a correlation model if we take into account the relative changes in power within one profile.

Введение

Измерение осадки конуса бетонной смеси присутствует во всех строительных лабораториях при производстве бетонных смесей и является одним из методов контроля качества подвижности. Несмотря на свою простоту, сам процесс измерения занимает определенное рабочее время технолога, трудоемок и, помимо прочего, подвержен влиянию «человеческого фактора». Последний сводится к тому, что одна и та же бетонная смесь может показать (и, скорее всего, покажет) у двух разных технологов различные значения осадки конуса. С практической точки зрения методы оценки подвижности бетонной смеси, уменьшающие влияние «человеческого фактора» и трудоемкость процедуры измерения, представляют значительный интерес и актуальность.

Одним из направлений развития в решении данной проблемы является применение реометров для определения таких показателей бетонной смеси, как вязкость и предел текучести. Ограничивающими факторами в данном случае являются как стоимость данных приборов, так и сложность обработки данных и последующей интерпретации полученных параметров — значения вязкости и предела текучести извлекаются из данных измерений путем неоднозначной процедуры аппроксимации усредненных значений моментов вала и скоростей вращения лопаток реометра [1-2]. Косвенным и с практической точки зрения обнадеживающим, но не замещающим реометрический метод определения показателей подвижности, является способ использования данных о потребляемой смесителем в процессе перемешивания бетонной смеси мощности. Принципиальным (и не единственным) отличием от реометра в данном случае является постоянная скорость вращения лопаток смесителя, а также большое влияние сторонних факторов, связанных с конструкцией и схемой смесителя. Ограничение, связанное с постоянством скорости вращения, приводит к тому, что показатели мощности с весьма малой вероятностью будут содержать информацию о вязкости бетонной смеси, однако почти наверняка они будут иметь высокую корреляцию со значениями предела текучести. Последний, как показано в ряде работ [3-4], имеет высокие значения корреляции с осадкой конуса.

Приведенные рассуждения можно лишь на качественном уровне считать обоснованием корреляционной связи мощности перемешивания и значений осадки конуса бетонной смеси, и требуется глубокая методическая разработка данного подхода. Рациональный взгляд на данную задачу предполагает на начальном этапе зафиксировать все возможные параметры, которые могут варьироваться, кроме какого-то одного — из обширной номенклатуры смесителей выбрать один, наиболее часто встречающийся, ограничиться одной

и той же скоростью вращения лопастей, постоянным объемом бетонной смеси и т.д. Далее необходимо определить экспериментально как будут изменяться осадка конуса и мощность перемешивания в зависимости от свободно варьируемого параметра. После этого нужно поэтапно закрывать вопросы со всем спектром возможных варьируемых параметров. Очевидно, что данная работа займет определенное количество времени и ресурсов, однако важно акцентировать внимание, что это разовый цикл исследований, формирующий базу для калибровки последующих методов оценки подвижности смесей на основе анализа мощности перемешивания.

Следует отметить также еще одну сложность, связанную размерностью данных. Как правило, с практической точки зрения представляет интерес какая-то одна или несколько количественных характеристик подвижности: осадка конуса, предел текучести и т.д. В этом случае легко определить критерий приемки смеси и задать допустимые отклонения в большую/меньшую сторону. Однако мощность перемешивания представляет собой некоторую зависимость от времени и ее невозможно охарактеризовать полностью каким-либо одним числом. На практике можно создать бетонную смесь объемом 10 л, показывающую осадку конуса 20 см и потребляющую среднюю мощность при своем перемешивании 400 Вт. В то же время можно подобрать объем бетонной смеси, показывающей осадку конуса 2 см, таким образом, что средняя потребляемая мощность для перемешивания этой малоподвижной смеси будет также равна 400 Вт. Хотя конкретно эта проблема и решается с помощью нормирования данных на объем смеси, тем не менее, суть проблемы описания мощности одним количественным показателем она демонстрирует. Отметим, что представленная работа сфокусирована в первую очередь на лабораторных смесителях, рассчитанных на объем бетонной смеси до нескольких десятков литров. Особенностью работы с промышленными смесителями являются существенно более короткая длительность перемешивания смеси и больший объем перемешивания. Первый фактор ограничивает возможность применения чувствительных к объему статистических данных методов, а второй сглаживает различные эффекты, связанные с флуктуациями плотности в процессе перемешивания.

Подводя итог вышесказанному, сформулируем ключевой вопрос исследования на данном этапе в виде определения «стабильного» набора параметров мощности перемешивания бетонной смеси, позволяющих охарактеризовать ее подвижность. Важным является именно понятие «стабильности» параметров, которое будет раскрыто в последующих разделах представленной работы.



Рис. 1. Используемый лабораторный бетономеситель принудительного действия, производимый компанией Fortis

Характеристики потребляемой мощности лабораторным смесителем без нагрузки

Базовым смесителем принудительного действия выбран типовой вариант установки, производимой компанией Fortis (рис. 1, изображение взято с сайта компании [5]), рассчитанной на объем смеси до 10 л. Измерительная схема включает в себя универсальный измеритель параметров электрических сетей WB-МАРЗЕ с интерфейсом RS-485 на основе микросхемы Atmel M90E32AS и контроллер Wiren Board 7 для первичной обработки данных.

Под работой смесителя без нагрузки понимается режим без бетонной смеси – двигатель работает вхолостую. Ожидаемая интуитивная зависимость мощности от времени в этом случае – некоторая постоянная величина. На практике, однако, реализуется совершенно другой сценарий. Так, на рис. 2 представлены 3 зависимости мощности от времени при работе смесителя без нагрузки, из анализа которых можно отметить, во-первых, отсутствие постоянного значения мощности, а, во-вторых, значительный разброс значений мощности между различными запусками. Все три панели выполнены в одном масштабе по шкале мощности. По горизонтальной оси откладывается время в минутах. Первое испытание продолжалось 20 мин, второе и третье – 60 и 90 мин, соответственно. Целью являлось определение длительности работы смесителя, после которого можно было бы считать потребление мощности постоянной величиной в смысле среднего значения.

Отметим, что характер изменения мощности в каждом испытании – скачкообразный. На примере испытания №1 можно, например, условно выделить 6 участков, переход к каждому из которых осуществляется скачком по мощности. Причиной скачков могут быть конструктивные особенности устройства, переключение либо внутренних реле, либо срабатывание каких-либо таймеров. С точки зрения описания подобного характера зависимости – выявление причин скачков имеет второстепенный характер. Первичным является величина скачка и регулярность его проявления – для данных испытания №1 первые находятся в диапазоне от 10 до 20 Вт. Для испытаний №2 и №3 – величина скачка может достигать почти 50 Вт. При этом какой-либо регулярности в его проявлении обнаружено не было.

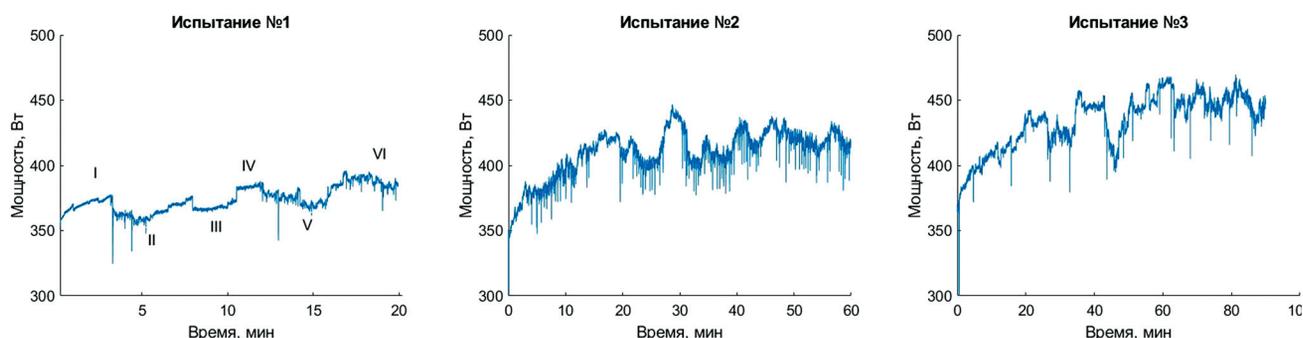


Рис. 2. Зависимость от времени мощности, потребляемой смесителем без нагрузки. Панель слева – длительность 20 мин, в середине – 60 мин, справа – 90 мин.

ТАБЛИЦА 1. СОСТАВ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОФИЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

№	Щебень, кг	Песок, кг	Цемент, кг	Вода, л	Осадка конуса, см
1	1031	844	350	200	1-2

В промежутках между скачками, мощность меняется хаотическим образом, флуктуируя относительно некоторого усредненного значения – тренда. Визуально характер среднего значения мощности достигает насыщения в смысле среднего значения после 20–30 мин работы – до этого времени тренд мощности возрастающий.

Оценим статистические свойства представленных на рис. 2 зависимостей. Во-первых, определим среднее значение мощности в пределах различных участков на примере крайней левой панели рис. 2. Средние значения мощности для сегментов I, II, III, IV, V и VI – 368,6; 364,0; 368,0 383,1; 374,7 и 387,3 Вт, соответственно. Максимальная разница между этими значениями составляет величину чуть большую 23 Вт. Среднее за весь период измерений равняется величине 373,3 Вт при среднеквадратическом отклонении 9,7 Вт. С учетом последней величины, примерно 70% интервал неопределенности мощности смесителя без нагрузки составляет величину порядка 19 Вт, а 95% интервал – почти 39 Вт. Оценки, полученные по

ТАБЛИЦА 2. УСРЕДНЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ПО СЕГМЕНТАМ ДЛЯ КАЖДОГО ИСПЫТАНИЯ, Вт.

№ Испытания	Этап I	Этап II	Этап III	Градиент этапа III	Этап IV
1	325	439	419	23	443
2	344	446	416	29	431
3	355	459	429	33	450
4	352	449	425	44	455
5	357	473	452	53	466
6	375	479	466	46	478
7	339	435	412	31	463
8	346	443	428	24	468
9	390	497	479	21	485
10	372	471	470	30	503
Среднее	356	459	440	33	464
Ср.Кв.Откл.	19	20	25	11	21

ТАБЛИЦА 3. СОСТАВЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОСАДКИ КОНУСА

№	Щебень, кг	Песок, кг	Цемент, кг	Вода, л	Осадка конуса, см
2	936	785	350	210	10
3	951	778	350	235	19

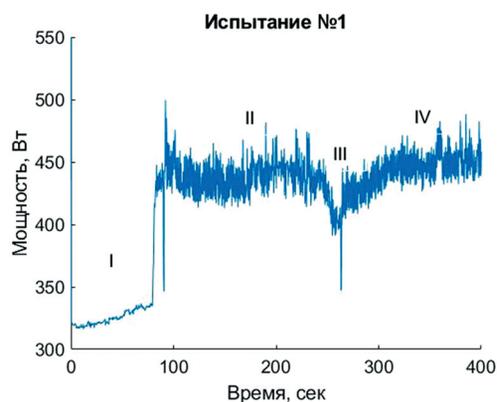


Рис. 3. Профиль потребления мощности смесителем с бетонной смесью (см. табл. 1)

данным испытаний №2 и №3, – средние за весь период – 409,6 и 434,9 Вт, и среднеквадратические отклонения – 18,0 и 20,9 Вт. Ориентируясь на наихудший сценарий можно утверждать, что 95% интервал неопределенности мощности смесителя без нагрузки может достигать 80 Вт (что означает ± 40 Вт относительно среднего значения). Отметим, что разница между средними значениями испытаний №3 и №1 – примерно 60 Вт, что укладывается в полученный диапазон. При этом случайные флуктуации мощности в процессе одной реализации могут достигать величины 50 Вт. Чтобы понять значимость приведенных оценок, необходимо рассмотреть, как паттерн мощности изменится при работе смесителя с бетонной смесью.

Характеристики потребляемой мощности лабораторным смесителем с бетонной смесью

Полученные в предыдущем разделе характеристики мощности смесителя без нагрузки будут иметь практический смысл для сравнения аналогичных характеристик в случае работы смесителя с бетонной смесью. Подобное сравнение позволит оценить уровень проблем и сложности в задаче выявления корреляции мощности и свойств бетонной смеси. В табл. 1 представлен выбранный для исследования состав бетонной смеси с классом подвижности П1. Объем смеси во всех экспериментах составлял 7 л, какие-либо модификаторы (химические, минеральные) не использовались. Выбор класса подвижности обусловлен исключительно начальным этапом исследования. В дальнейшем планируется также собрать статистические данные по классам подвижности П3 и П4-П5.

Протокол перемешивания во всех испытаниях фиксированный — первые 20-40 сек смеситель работает без бетонной смеси, далее, не останавливая смеситель, засыпаются сухие материалы в последовательности: крупный заполнитель, песок, цемент. Сухая смесь перемешивается примерно 3 минуты, добавляется вода и далее смесь перемешивается в течение следующих 2-х минут.

На рис. 3 представлен профиль потребления мощности смесителем, где выделено 4 различных участка в соответствии с протоколом перемешивания. Участок III соответствует этапу добавления воды, остальные — самоочевидны из сравнения с протоколом. Количественная оценка средних значений мощности за соответствующую длительность по каждому сегменту следующая: I — 325 Вт (тренд не принимается во внимание), II — 439 Вт (тренд отсутствует), III — 419 Вт (разница между максимальным и минимальными значениями 23 Вт), IV — 443 Вт (тренд также не принимается во внимание). Из приведенных количественных значений можно отметить тот факт, что количественный эффект в профиле мощности, связанный с добавлением воды в смесь, составляет величину порядка 20 Вт, уровень мощности перемешивания сухих материалов сравним с уровнем мощности перемешивания бетонной смеси. Обращая внимание на величину среднеквадратического отклонения смесителя без нагрузки (см. предыдущий раздел), следует вывод, что корреляции характеристик мощности свойств бетонной смеси лежат в пределах уровня стандартного среднеквадратического отклонения. Следует также отметить, что существует разница в более чем 100 Вт между значениями мощности смесителя без нагрузки и с бетонной смесью, что может представлять определенный практический интерес. Для понимания статистической полноты картины было проведено 10 повторных испытаний состава из табл. 1, и полученные результаты усредненных значений по каждому из этапов каждого испытания представлены в табл. 2.

Как следует из данных табл. 2, уровень отклонения относительно среднего значения мощности в каждом из сегментов составляет величину порядка 20 Вт, для градиента мощности на этапе добавления воды

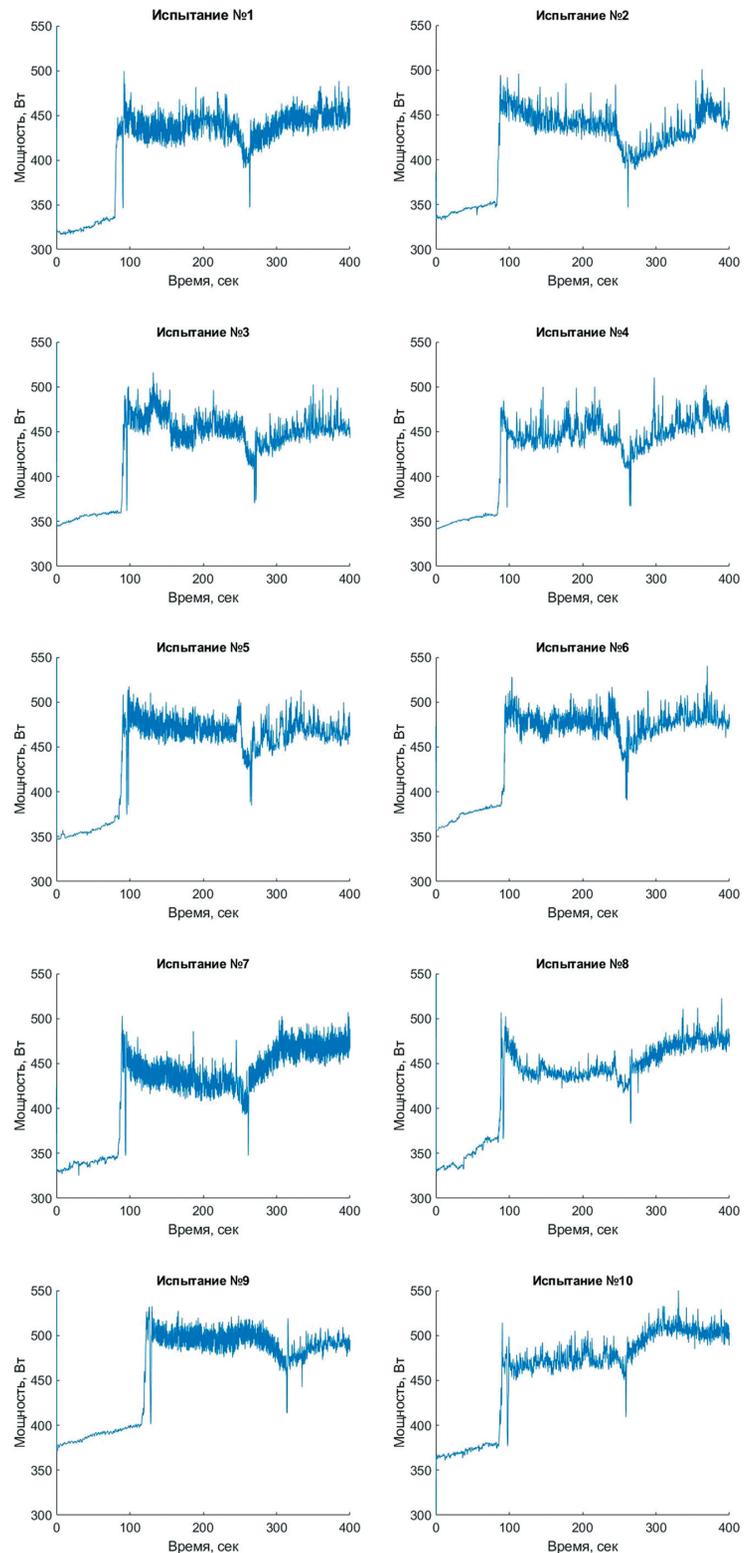


Рис. 4. Повтор испытаний состава 1 из табл. 1

— 11 Вт, что в два раза меньше по сравнению с другими отклонениями, однако с учетом уровня (33 Вт), относительно которого вычисляется это отклонение — 11 Вт составляет порядка 30%. В свою очередь, 20 Вт относительно 400 Вт — порядка 5%.

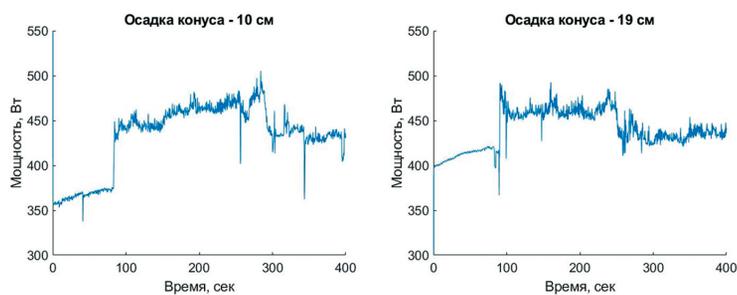


Рис. 5. Профиль мощности для бетонной смеси, показывающей осадку конуса 10 (слева) и 19 (справа) см

В табл. 3 приведены 2 состава бетонной смеси, показывающей осадку конуса 10 и 19 см, соответственно. Профиль мощности для каждого состава приведен на рис. 5. Уровень мощности смесителя без нагрузки составил величину 406 и 412 Вт.

Уровень мощности перемешивания сухих материалов для составов 2 и 3 табл. 3 – 477 и 461 Вт, что сравнимо с аналогичным значением для состава 1 из табл. 1 с осадкой конуса 1-2 см. Уровень мощности участка с добавлением воды (этап III) для составов 2 и 3 табл. 3 – 470 и 454 Вт, что находится в пределах среднеквадратического отклонения аналогичного показателя состава 1 табл. 1. Не являются исключением и значения мощности на этапе перемешивания бетонной смеси после добавления воды – уровни мощности 452 и 433 Вт для составов 2 и 3 табл. 3 находятся в пределах значений отклонения аналогичных показателей состава с осадкой конуса 1-2 см. Таким образом, ориентация на абсолютные значения мощности (в смысле усреднения) ни на каком из этапов не даст информации о значении осадки конуса бетонной смеси. Отметим, что данный вывод не следует обобщать на другие смесители, поскольку, скорее всего, уровни потребляемой мощности в первую очередь скоррелированы с объемом бетонной смеси. Допускается, что при рассмотрении работы смесителя, например, на 20 л, корреляция абсолютных значений мощности с осадкой конуса может быть более ярков выражена.

Поиск корреляционной зависимости между осадкой конуса и мощностью в случае малых объемов бетонных смесей (до 10 л) следует искать, на взгляд авторов, не в парадигме абсолютных значений мощности, а в выявлении соотношений между

значениями мощности одной и той же смеси на различных этапах. Так, например, можно обратить внимание на то, что разница между мощностью перемешивания смеси после добавления воды и соответствующим уровнем смесителя без нагрузки составляет следующие значения: для осадки конуса 1-2 см – 108 Вт, для 10 см – 46 Вт и для 19 см – 21 Вт. Данные значения уже находятся за пределами среднеквадратического отклонения. Следовательно, на этой базе допускается возможность оценки корреляции между этими величинами и значениями осадки конуса, что будет подробно раскрыто в ходе следующего этапа работы.

Заключение

В работе проведена оценка потенциальных возможностей построения корреляционных моделей осадки конуса со значениями мощности смесителя на различных этапах перемешивания бетонной смеси. На примере конкретного смесителя показано, что статистические характеристики мощности не позволяют в пределах среднеквадратического отклонения однозначно связать показатель осадки конуса и средний уровень мощности, однако существует возможность построения подобной вероятностной модели, если принять во внимание относительные изменения мощности на различных этапах перемешивания.

Библиографический список

1. Amine el Mahdi Safhi, Hamed Dabiri, Ahmed Soliman, Kamal H. Khayat, Prediction of self-consolidating concrete properties using XGBoost machine learning algorithm: Rheological properties. – *Powder Technology*, 2024, p. 119623.
2. Guoming Liu, Weimin Cheng, Lianjun Chen, Gang Pan, Zhaaxia Liu, Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. – *Construction and Building Materials*, 2020, p. 118180.
3. Callum White, Janet M. Lees, Yield stress prediction from 3D reconstruction of fresh concrete slump. – *Cement and Concrete Research*, 174, 2023, p. 107331.
4. N. Roussel, Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results. – *Mater. Struct.*, 39, 2006, p. 501-509.
5. Сайт компании: <https://fortis-vrn.ru/> (на момент обращения 08.2024).