

# МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ КОНУСА В ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫЙ РАСТВОР ПО ДАННЫМ МОЩНОСТИ СМЕСИТЕЛЯ

**Р.О. РЕЗАЕВ**, канд. физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «Проектирование материалов», г. Москва, доцент ТПУ, г. Томск, Россия; **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 представлены результаты разработки модели для прогнозирования подвижности цементно-песчаного раствора по профилю мощности, потребляемой смесителем. Экспериментальные данные включают в себя выборку из 81 элемента. Она разбивается случайным образом на обучающую и тестовую для оценки ошибки прогнозирования. Модель обобщает такие варьируемые факторы, как гранулометрический состав песка, влажность и наличие/отсутствие пластифицирующей добавки. В качестве меры подвижности используется глубина погружения металлического конуса в свежеприготовленный раствор. Для описания профиля мощности смесителя предложена аналитическая зависимость, параметры которой составляют основу модели прогнозирования. Построенная модель показывает высокие значения корреляции (85%) с экспериментальными данными, обеспечивая среднеквадратическую ошибку прогнозирования порядка 2 см. Преимущества данного подхода проиллюстрированы сравнением с моделью, построенной только по одному показателю, – средней мощностью перемешивания. Данный показатель демонстрирует 20%-ую корреляцию с экспериментальными данными, что недостаточно для практического использования в задачах контроля качества.

The article presents the results of developing a model for predicting the fluidity of cement-sand mortar based on the mixer power profile. The experimental data include a sample of 81 elements, which is randomly divided into training and testing to estimate the prediction error. The model generalizes such variable factors as sand granulometric composition, humidity, and the presence/absence of a plasticizing additive. The immersion depth of the metal cone in the freshly prepared mortar is used as a measure of fluidity. An analytical dependence is proposed to describe the mixer power profile, the parameters of which form the basis of the prediction model. The constructed model shows high correlation values (85%) with experimental data, providing a root-mean-square prediction error of about 2 cm. The advantages of this approach are illustrated by a comparison with a model constructed using only one indicator – average mixing power, which shows a 20% correlation with experimental data, which is insufficient for practical use in quality control problems.

### Введение

Подвижность бетонной смеси является одним из критически важных технологических показателей, подлежащих операционному контролю. В качестве меры подвижности в производственной практике в РФ и за рубежом часто используется такая величина, как «осадка конуса». Металлический усеченный конус со стандартными размерами, находящийся на плоской поверхности, полностью заполняется бетонной смесью и уплотняется штыкованием, после чего оператор плавно поднимает конус вертикально вверх и далее измеряется величина оседания бетонной смеси под действием силы тяжести. Диапазон значений такой осадки от 1 до 25 см определяется высотой металлического конуса (30 см) и текучестью бетонной смеси. В зависимости от назначения бетонной смеси осадка конуса нормируется на определенное значение с учетом погрешности. Например, товарная бетонная смесь часто нормируется по осадке конуса на диапазон 18–22 см, такая бетонная смесь обладает достаточно высокой подвижностью для равномерного заполнения опалубки.

Стабильность характеристик выпускаемой продукции является конкурентным преимуществом предприятия. Не является исключением и производство бетонных смесей. При этом актуальным является вопрос, как обеспечить стабильность подвижности бетонной смеси, если в качестве показателя брать параметр, требующий непосредственного участия человека в измерительном процессе? В силу трудоемкости этого процесса сложно представить ситуацию, когда каждую единицу объема выпускаемой бетонной смеси будет сопровождать рабочий, определяющий ее осадку конуса. Входной контроль качества используемых материалов не решает данную проблему, т.к. подвижность имеет высокую чувствительность к характеристикам, например, технической воды, которые не являются целевыми при входном контроле.

Решение проблемы контроля качества и обеспечения стабильности подвижности может лежать скорее в области автоматизации сбора и анализа данных. Автоматизация различных технологических операций позволяет ослабить давление, связанное с человеческим фактором — недостаток квалифицированного персонала — одна из

ключевых проблем производства не только в РФ, но и за рубежом. Если трендом конца 90-х и начала 00-х годов являлась прежде всего автоматизация механических операций — заполнение лабораторных и технологических журналов, контроль измерений и т.д., то трендом сегодняшнего дня является автоматизация интеллектуальных операций. К этому направлению можно отнести автоматический сбор и анализ данных, а также принятие соответствующих решений, минимизирующих заданные риски. Практическим воплощением данного тренда является технология/концепция интернета вещей, представляющая собой сеть передачи данных между различными физическими объектами, оснащенными средствами взаимодействия друг с другом [1–2].

Концепция интернета вещей обеспечила рынок большим количеством различных устройств, из которых можно собирать небольшие и недорогие схемы контроля качества, применимые в производстве бетонной смеси.

В частности, интерес представляют недорогие датчики, позволяющие измерять температуру, давление, влажность и преобразователи сигналов с этих датчиков в формат, совместимый с протоколами передачи данных по сети интернет, которая в случае предприятия может быть как локальной (для сохранения конфиденциальности в пределах организации), так и подключенной к глобальной сети интернет.

Если говорить о задаче контроля подвижности бетонной смеси, то фактически единственным элементом, где можно этот контроль ввести в смысле автоматического сценария, — это смесительное устройство. В качестве измеряемого сигнала в данном случае может служить либо потребляемая смесителем мощность, либо деформационные нагрузки на вращающиеся элементы (вал электродвигателя), либо вибрационные или акустические сенсоры.

Существуют также подходы, связанные со сбором видеосигналов процесса перемешивания, однако дополнительные условия на освещение и периодическую очистку видеокамеры ограничивают перспективы применения данных методов.

Сбор информации о потребляемой мощности является наиболее простым и дешевым с практической точки зрения.

В самом минимальном исполнении требуется только измерительный прибор и преобразователь сигнала. Подобные решения широко представлены в коммерческом сегменте, например, измеритель мощности Wigen Board WB-MAP3E и преобразователь интерфейса WB-USB485.

Анализ литературы на предмет взаимосвязи мощности смесителя и осадки конуса бетонной смеси не дает исчерпывающей методологической базы для построения надежного технологического решения [3-5]. Постановка такой задачи упирается в широкую номенклатуру различных типов смесителя, используемых материалов, погрешности дозирующих устройств, определяющих объем смеси. Кроме того, сам объем смеси также имеет важное значение.

Следующей группой факторов, осложняющих постановку задачи, является спектр используемых материалов для бетонной смеси, начиная от различных химических модификаторов и заканчивая сложными многокомпонентными системами из семи и более компонент. Все это в совокупности с протоколом перемешивания будет определять профиль потребляемой смесителем мощности.

В силу своей сложности задачу определения взаимосвязи подвижности бетонной смеси и мощности смесителя разумнее начинать с простейшего сценария, двигаясь в сторону усложнения по количеству разнообразных факторов. Одним из таких вариантов является фиксирование конкретного смесителя и моделирование реальной бетонной смеси растворной составляющей.

В качестве модельной ситуации можно заменить бетонную смесь более простой – цементно-песчаным раствором, и мерой подвижности взять глубину погружения металлического мини-конуса.

Раствор состоит из трех компонент – песок, вода и цемент – экспериментальная программа может состоять из факторов, связанных с гранулометрическим составом песка, а также добавлением пластифицирующей добавки.

Целью данной работы является установление принципиальной возможности построения модели прогнозирования подвижности смеси по данным мощности смесителя. Если окажется, что для цементно-песчаного раствора отсутствует какая-

либо систематически значимая корреляция между указанными параметрами, то оно однозначно не будет наблюдаться и в более сложных системах – типа бетонной смеси.

В работе представлены результаты данного исследования, в частности, показано, что если в качестве базы для модели брать исключительно значение мощности, то построить значимую корреляционную модель для растворной части не получится, даже если в ряде случаев она даст положительные результаты, при замене материалов модель перестанет работать. Однако при более комплексном анализе профиля мощности оказывается возможным достичь корреляции между мощностью и подвижностью вплоть до уровня 85%. Данный результат открывает хорошие перспективы для построения модели прогнозирования осадки конуса для полноценной бетонной смеси.

### **Экспериментальный план и характерный профиль потребляемой мощности**

Базовым смесителем принудительного действия выбран типовой вариант установки, производимой компанией Fortis (рис. 1, изображение взято с сайта компании [6]), и рассчитанной на объем смеси до 10 л. Измерительная схема включает в себя универсальный измеритель параметров электрических сетей WB-MAP3E с интерфейсом RS-485 на основе микросхемы Atmel M90E32AS и контроллер Wigen Board 7 для первичной обработки данных.

Для приготовления раствора использовался типовой цемент, песок и вода. Варьируемыми факторами являлись модуль крупности песка, влажность, пластифицирующая добавка. Также было выполнено несколько экспериментов на смесителе похожей конструкции, но другого производителя. Объем перемешиваемой смеси составлял 5 л, мерой подвижности раствора являлась глубина проникновения металлического конуса (см. например, ГОСТ 28013-98). В табл. 1 приведен реализованный экспериментальный план с пояснением в заголовке к таблице. Количество составов – 81, при этом важным условием являлось покрытие в каждой группе факторов всего диапазона допустимых значений глубины погружения конуса – от 1 до 12-13 см. Протокол перемешивания состоял из трех этапов

– вначале был этап (1-1,5 мин) работы смесителя без материалов, далее не выключая смеситель загружалась смесь из цемента и песка, после примерно 3 мин перемешивания добавлялось расчетное количество воды и смесь перемешивалась 2-3 мин. Необходимость включения в план данных о мощности работы пустого миксера обусловлена ее случайным значением. Так, при повторном включении смесителя, значение потребляемой мощности может отличаться на несколько десятков Вт в большую или меньшую сторону. Такие колебания могут быть связаны как с конструктивными особенностями смесителя, так и с внешними факторами, например, с нестабильностью параметров электрической сети.

На примере группы составов на песке со средним модулем крупности (табл. 1)

можно увидеть, что диапазоны варьирования расхода песка – от 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup>, цемента – от 400 до 900 кг/м<sup>3</sup>, воды – от 240 до 420 л/м<sup>3</sup> – практически полностью покрывают весь возможный спектр потенциальных значений. Как следствие, результаты по подвижности охватывают диапазон возможных значений – от 1 до более чем 12 см. Таким образом, выборка данных является репрезентативной как по исходным, так и по целевым данным.

На рис. 2 представлены профили потребляемой мощности для 3-х различных составов (табл. 1). Масштабы осей мощности и времени на всех графиках совпадают. Отметим, во-первых, что мощность работы пустого миксера, как и утверждалось выше, имеет случайный характер. Для первого состава мощность начинается с примерно

**ТАБЛИЦА 1. СПИСОК РЕАЛИЗОВАННЫХ СОСТАВОВ И ЗНАЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ КОНУСА, СООТВЕТСТВЕННО, ЯЧЕЙКАМ ТАБЛИЦЫ. ЛСТ - ПЛАСТИФИЦИРУЮЩАЯ ДОБАВКА НА ОСНОВЕ ЛИГНОСУЛЬФОНАТА, ГРАДАЦИЯ ПЕСКА ПО МОДУЛЮ КРУПНОСТИ - СРЕДНИЙ, КРУПНЫЙ (КР.), ГДЕ НЕ УКАЗАНО - ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ, СУХ. - СУХОЙ. СОСТАВЫ СО ЗВЕЗДОЧКОЙ (\*) - ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ОСУЩЕСТВЛЯЛОСЬ НА СМЕСИТЕЛЕ ДРУГОГО ПРОИЗВОДИТЕЛЯ, ОТЛИЧНОГО ОТ [6] (РИС. 1). НУМЕРАЦИЯ СОСТАВОВ ИДЕТ СЛЕВА-НАПРАВО, СВЕРХУ-ВНИЗ. НАПРИМЕР, СОСТАВ №1 - ПЕСОК - 1545 КГ/М<sup>3</sup>, ЦЕМЕНТ - 550 КГ/М<sup>3</sup>, ВОДА - 240 Л/М<sup>3</sup>, ГЛУБИНА ПОГРУЖЕНИЯ КОНУСА - 1,5 СМ.**

		Песок, кг/м <sup>3</sup>			Цемент, кг/м <sup>3</sup>			Вода, л/м <sup>3</sup>			Глубина погружения, см		
Средний		1545	1479	1413	550	550	550	240	265	290	1,5	2,0	3,3
		1347	1280	1272	550	550	685	315	340	300	6,0	9,0	6,5
		1215	1170	1095	550	600	705	365	365	360	12,5	12,5	12,2
		1160	1150	1092	675	765	630	345	320	385	11,5	7,5	12,3
		1057	1139	1230	780	855	795	350	295	280	10,5	5,8	4,2
		1310	1369	1331	795	740	630	250	245	295	1,3	1,3	2,6
		1223	1098	1012	890	935	880	252	285	335	1,2	3,2	8,5
		1006	1433	1033	685	650	575	400	250	425	12,8	2,0	12+
		1106	1228	1370	505	455	460	420	390	335	12+	12+	10
Средний + ЛСТ		1545	1479	1413	550	550	550	240	265	290	4,0	6,0	8,3
		1347	1280	1611	550	550	550	315	340	215	12,0	12,5	1,8
		1372	1335	1356	630	720	820	280	265	225	6,5	5,8	1,5
		1442	1460	1550	765	650	660	210	240	203	2,0	3,5	1,5
		1271	1261	1272	655	760	870	310	280	240	10,3	5,0	1,5
		1190	1174	1097	810	720	780	290	325	335	5,5	11,0	11,5
Крупный		1345	1477	1237	630	630	610	290	240	337	6,5	2,0	12,5
		1183	1187	1288	680	815	550	335	290	337	12,0	6,0	11,0
		1426	1350	1271	700	765	810	237	245	260	2,0	1,5	4,0
		1293	1230	1125	690	750	745	290	295	335	9,0	8,0	10,5
		1340	1176	1293	638	822	544	289	291	337	5,5	3,2	9,5
		1440	1288	1414	501	638	616	295	308	268	7,0	6,0	4,0
		1545	1479	1413	550	550	550	240	265	290	1,5	3,8	6,5
		1347	1678	1611	550	550	550	315	190	215	9,3	0	0
Кр. Сух.		1476	1347	1237	551	630	609	265	289	337	6,5	8,5	11,5
		1135	1271	1375	666	810	731	357	259	245	12,5	2,5	1,5
		1353	1343	1338	622	626	636	289	291	290	8,5	9,0	8,5
		1347*	1375*	1135*	630*	731*	666*	289*	245*	357*	9,0*	2,5*	12,5*



Рис. 1. Лабораторный бетономеситель принудительного действия, производимый компанией Fortis [6]

340 Вт, для второго – с 360 Вт. Для третьего – с 350 Вт. На каждом графике отчетливо отмечается момент добавления в смеситель цемента и песка (без воды). Примерно на 90-й секунде мощность скачком возрастает на 20-30 Вт. После 250-й секунды добавляется вода, что приводит изменению профиля потребления мощности – формируется немного «растянутый» по времени пик, который связан как с особенностями взаимодействия воды с частицами твердой фазы – из-за преодоления сил поверхностного натяжения мощность возрастает, так и с вмешательством оператора. Часть раствора, непосредственно примыкающая к стенке емкости, переставала участвовать в цикле перемешивания из-за зазора между стенкой и лопатками смесителя. Поэтому необходимо было внести дополнительные усилия, не выключая смеситель. С помощью мастерка пристенные участки раствора перераспределялись в центральную часть смесителя. В результате формирования связной структуры смеси весь ее объем в результате начал участвовать в цикле перемешивания.

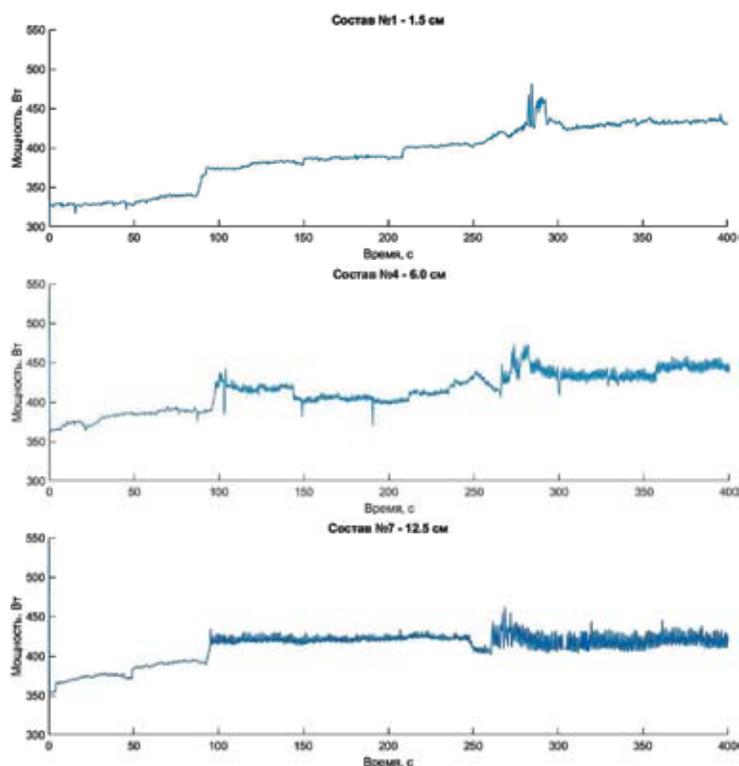


Рис. 2. Зависимость от времени мощности, потребляемой смесителем для трех различных составов из табл. 1.

### Модель для описания профиля мощности

Существует несколько подходов к разработке математической модели интересующих процессов. В тех случаях, когда имеется возможность установить физико-химические закономерности, определяющие процесс, можно разрабатывать причинно-следственную модель.

Как правило, такая ситуация в производственной практике встречается нечасто – количество разнообразных факторов, влияющих на изучаемый процесс, заведомо больше того количества, что можно обоснованно определить в модели. Например, в контексте обсуждения проблемы моделирования профиля мощности, в причинно-следственную модель необходимо будет вносить конструктивные особенности смесителя, взаимодействие частиц цемента и заполнителей между собой и с жидкой фазой, неоднородное распределение всех компонентов по объему смеси и т.д. При этом практическая польза от такой модели в плане прогнозирования подвижности смеси по профилю мощности далеко не так очевидна.

Более простой, но имеющей ценность для производственной деятельности является не причинно-следственная, а корреляционная модель. С ее помощью оценивается корреляция каких-либо величин, и далее, имея информацию о какой-то одной из таких величин, можно сделать вывод о значении второй, скоррелированной с первой. При этом наличие причинно-следственной связи между этими величинами не утверждается. Валидация практической пользы таких моделей базируется на объеме статистической выборки – чем больше данных используется для оценки степени корреляции, тем более можно быть уверенным в корреляционной взаимосвязи соответствующих величин. Авторы данной работы пошли именно по пути разработки корреляционной модели для решения задачи прогнозирования подвижности смеси по профилю мощности смесителя. Для этого в первую очередь необходимо каким-либо аналитическим образом описать наблюдаемый профиль мощности. Не претендуя на уникальность, можно предложить участок, соответствующий пустому миксеру, аппроксимировать как постоянное значение мощности, а участки, соответствующие перемешиванию сначала сухих материалов, а затем с добавлением воды – зависимостью вида:

$$p = A + B \times \tanh\left(\frac{[t - t_w]}{t_d}\right), \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $t_w$ ,  $t_d$  – параметры, описывающие ключевые элементы профиля: уровень мощности до и после добавления воды, момент времени добавления воды и длительность перемешивания, в течение которого смесь достигает однородной консистенции. На рис. 3 приведен пример того, как аналитическая зависимость (1) описывает профиль мощности. Отметим, что  $A+B$  соответствует уровню мощности смесителя после добавления воды.

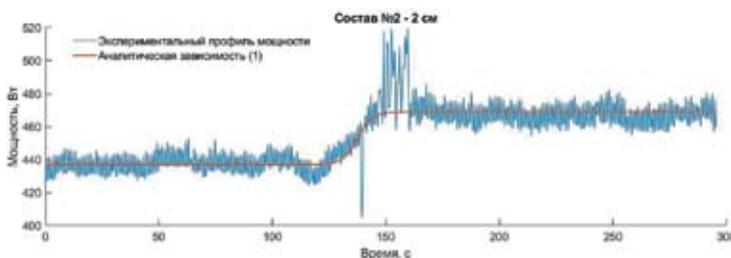


Рис. 3. Профиль потребления мощности смесителя для состава №2 (см. табл. 1) и соответствующая аппроксимация выражением (1), где  $A$ ,  $B$ ,  $t_w$ ,  $t_d = 453, 16, 138, 6$ , соответственно

## Кросс-валидация

Практическая польза от математического описания профиля мощности будет в том случае, если удастся количественно оценить ее возможности прогнозирования значений глубины погружения конуса. Поскольку количество экспериментальных точек (табл. 1) достаточно велико, имеется возможность эту выборку разбить на две – одну, состоящую из, например, 70 составов использовать для построения корреляционной модели, а другую – 10-11 составов, использовать для сравнения прогнозных и фактических значений глубины погружения конуса. Далее можно эту процедуру повторять неоднократно, каждый раз случайным образом разбивая исходную выборку на две и проверяя, насколько точно корреляционная модель предсказывает глубину погружения.

## Построение модели и результаты прогнозирования

Выбрав случайным образом 70 составов из табл. 1 нами была построена корреляционная модель для прогнозирования глубины погружения:

$$h = -24,6 - 62,7x_1 - 0,024x_2 - 0,09x_3 + 98,3x_4 + 16,3x_5, \quad (2)$$

где  $h$  – глубина погружения в см,  $x_1 = (A+B)/A$ ,  $x_2 = t_w$ ,  $x_3$  – полная средняя мощность за вычетом мощности пустого миксера,  $x_4$ ,  $x_5$  – средняя мощности на участке добавления воды и соответствующее среднее квадратическое отклонение. Значение корреляции между набором переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  и экспериментальными значениями глубины погружения – 85%. С учетом стохастического характера профиля мощности данное значение корреляции можно характеризовать как значительное. Линейная комбинация из вышеуказанных переменных в виде (2) дает корреляцию порядка 75%. Оставшиеся 10%, по всей видимости, следует отнести к нелинейным слагаемым. В табл. 2 приведены результаты сравнения для 10 составов, не вошедших в обучающую выборку.

Как можно увидеть из табл. 2, прогноз глубины погружения конуса на основе анализа профиля мощности с использованием модели (2) обеспечивает неплохие результаты. Среднее квадратическое отклонение прогноза от фактического значения состав-

ТАБЛИЦА 2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО МОДЕЛИ (2) С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

Фактическое значение $h$ , см	0,5	2,0	12,5	7,0	11,5	11,5	1,3	12,5	3,2	9,0
Прогнозное значение, см	2,9	1,3	10,4	9,0	9,2	12,4	1,7	8,7	3,6	10,9

ТАБЛИЦА 3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО МОДЕЛИ (3) С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

Фактическое значение $h$ , см	0,5	2,0	12,5	7,0	11,5	11,5	1,3	12,5	3,2	9,0
Прогнозное значение, см	7,1	7,1	8,3	7,1	7,1	7,1	7,1	8,0	7,1	7,1

ляет величину порядка 2 см, что сравнимо с допустимыми отклонениями, требуемыми в соответствии с государственными нормативами.

В заключение обсудим вопрос, какова будет точность прогнозирования глубины погружения, если ориентироваться только на значения мощности перемешивания. Этот случай часто можно встретить на практике, когда технолог пытается связать через вспомогательную калибровочную кривую фактическое значение мощности и подвижности бетонной смеси. На примере данных таблицы 1 нами была построена модель на базе только значений мощности:

$$h = 7,1 - 0,002p, \quad (3)$$

где  $p = A + B$ .

В табл. (3) приведены результаты сравнения прогнозных значений модели (3) с экспериментальными данными, из которых видны посредственные возможности данной модели. Однако можно, даже не вдаваясь в детали, только исходя из выражения (3), заключить, что ориентация на одну характеристику профиля мощности не позволяет провести различие между значениями глубины погружения конуса – в этом случае оптимальным решением с математической точки зрения будет просто среднее значение всех экспериментальных данных по глубине погружения. Расчет соответствующей корреляции в данном случае дает величину 21%, что указывает практически на отсутствие корреляции в данных.

## Заключение

В работе представлена экспериментальная программа и результаты обработки полученных данных с целью построения модели прогнозирования подвижности

цементно-песчаного раствора по профилю мощности смесителя. Экспериментальная программа покрывает различные варианты гранулометрического состава песка, его влажность, а также учтена возможность введения пластифицирующей добавки. На основе анализа данных предложена аналитическая аппроксимация профиля мощности. Параметры предложенной зависимости являются основной для построения прогнозной линейной модели, обеспечивающей корреляцию с показателем подвижности 85% на всей группе варьируемых факторов. Преимущество данного подхода выявляется на основе сравнения с результатами работы модели, построенной только по одному показателю мощности.

## Библиографический список

1. Фонтана К.А., Ерзкян Б.А., «Умная фабрика» и ключевые технологии Индустрии 4.0. – Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление, 4, 2022, с. 53-67.
2. Адамцевич Л.А., Харисов И.З., Обзор технологий индустрии 4.0 для разработки системы дистанционного управления строительной площадкой. – Строительство и архитектура, 9 (4), 2021.
3. Mahmoodzadeh F. and Chidiac S., Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete. – Cement and Concrete Research, 49, 2013, p. 1-9.
4. Daumann B., Anlauf H., and Nirschl H., Determination of the energy consumption during the production of various concrete recipes. – Cement and Concrete Research 39 (2009), p. 590–599.
5. Chopin D. et al., Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve. – Materials and Structures, 40, 2007, p. 897-907.
6. Сайт компании: <https://fortis-vm.ru/> (на момент обращения 10.2024).