

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Тараканова Олега Вячеславовича  
на диссертационную работу Бабенко Дмитрия Сергеевича  
**«Разработка критериев и методов оценки технологических характеристик  
смесей для 3D-печати»**,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.1.5 Строительные материалы и изделия

### **1. Актуальность темы диссертации**

Современные условия возведения зданий и сооружений требуют повышения эффективности строительного производства, обеспечения минимальной стоимости и трудоемкости технологических процессов за счет рационального использования материальных и энергетических ресурсов. Строительная 3D-печать относится к передовым производственным технологиям, которые направлены на автоматизацию и повышение эффективности строительного комплекса. Однако, при внедрении 3D-печатных технологий в строительстве возникает следующая проблема – отсутствие нормативных документов, регламентирующих весь жизненный цикл строительной 3D-печати.

Вопрос создания таких документов представляется наиболее важным, так как характеристики смесей для печати будут определять, во-первых, эксплуатационные параметры получаемых изделий и конструкций, а, во-вторых, возможности и эффективность технологического оборудования.

За последние несколько лет отечественными и зарубежными исследователями опубликовано большое количество работ, посвященных разработке критериев и методов оценки технологических характеристик смесей для строительной 3D-печати и исследованию комплекса их реологических и физико-механических свойств. Однако вопрос о создании единых методов их оценки остается открытым.

Реологические свойства смесей для строительной 3D-печати, в первую очередь, определяются их структурой, регулированию параметров которой в настоящий момент уделяется недостаточное внимание. Для повышения качества печатных строительных объектов, необходимо разработать единые методы оценки. Кроме того, необходимо развитие представлений о формировании структуры модифицированных цементных композитов на каждой из стадии процесса строительной 3D-печати.

В связи с этим, исследования по разработке единых методов и критериев оценки смесей для строительной 3D-печати и изучению их реологических и физико-механических характеристик являются актуальными.

### **2. Научная новизна исследований и полученных результатов**

Научная новизна заключается в оценке реологического поведения, состояния структуры и свойств цементных смесей как вязко-пластичных дисперсных систем

методами, моделирующими их поведение в технологических процессах 3D-печати, что позволяет обосновать количественные критерии пластичности и формоустойчивости.

В качестве новых научных результатов соискателем были типизированы модели реологического поведения смесей методом сдавливающей реометрии. При этом автором уточнён, диапазон значений критерия пластичности  $K(I)$  для обеспечения способности к экструзии вязко-пластичных цементных смесей. Экспериментально доказано, что соответствие разработанным критериям обеспечивают достижение необходимых технологических характеристик пластичности и формоустойчивости, которые определяют возможность бездефектной экструзии смеси в процессе 3D-печати.

Также автором разработан реометрический метод изучения реологического поведения смесей при сдавливании. При этом, соискателем отмечается, что такой подход изучения реологического поведения имеет научное обоснование.

Впервые разработаны три критерия формоустойчивости смесей для 3D-печати: структурная прочность, пластическая прочность и относительная деформация слоя.

### **3. Теоретическая и практическая значимость**

*Теоретическая значимость* диссертационной работы заключается в обосновании критериев и методов оценки технологических свойств смесей для 3D-печати.

*Практическая значимость* диссертационной работы заключается в разработке предложений по техническим методам определения текучести, пластичности, формоустойчивости и требований к диапазону их значений.

Наиболее важными результатами работы являются:

- разработаны научно-обоснованные требования к оценке реологического поведения и свойств смесей для 3D-печати в условиях, моделирующих сдавливающие воздействия при экструзии и послойной укладке;
- получены критерии и диапазон значений реологических показателей для пластичности и формоустойчивости смесей;
- результаты исследований реологического поведения и свойств цементных смесей для 3D-печати могут быть использованы для разработки новых ГОСТ Р и методов испытаний.

### **4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные принципы и заключения, изложенные в данной работе, обладают достаточной обоснованностью, поскольку они логически представляют собой продолжение текста диссертации. Эти принципы подтверждены экспериментальными данными и согласуются с основными современными научными концепциями в области материаловедения для строительства. Кроме

того, они дополняют традиционные подходы к улучшению технологий производства изделий и конструкций на основе цементных композитов и соответствуют результатам исследований других ученых.

### **5. Достоверность результатов исследований**

Достоверность и обоснованность результатов, описанных в данной работе, обеспечены обширной базой экспериментальных данных, полученных с использованием современного сертифицированного оборудования, а также за счет применения целого комплекса актуальных методов исследований.

### **6. Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа Бабенко Д.С. состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 221 странице, содержит 45 таблиц и 60 рисунков. Список литературы включает 119 наименования.

**Введение** диссертационной работы полностью соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011 “Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления” Во введении присутствуют все обязательные структурные элементы, в полной мере отражена актуальность темы исследования и степень её разработанности, сформулированы цели и задачи работы, обозначена научная новизна, практическая и теоретическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, также отдельное внимание уделено степени достоверности и апробации результатов исследования.

**В первой главе** диссертации соискателем проведены обзор существующих методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати. Осуществлена систематизация критериев оценки реологического поведения вязкопластичных смесей. Соискателем определена основная проблема — отсутствие общепризнанных и нормированных методов оценки. Сформулирована научная концепция, которая состоит в изучение реологического поведения методами сдвиговой и сдавливающей реометрии. Осуществлена разработка требований к техническим методам.

**Во второй главе** приводится характеристика сырьевых материалов, объектов, а также инструментальных методов исследования состава, структуры и свойств исследуемых объектов. Фактором варьирования является В/Ц отношение, влияющее на структурную прочность и агрегативную устойчивость смесей. Приведена методики определения реологических характеристик цементных систем твердения. В соответствии с целью и задачами диссертационной работы сформировано факторное пространство экспериментальных исследований. Рассматриваются Методы оценки и обеспечения достоверности результатов исследований.

**Третья глава** посвящена разработке реологических и оперативно-технических методов оценки пластичности и формоустойчивости смесей для 3D-

печати. Для этого проведены исследования реологических характеристик, процессов структурообразования при помощи сдвливающей и сдвиговой реометрии. На основе изучения пластического поведения смесей типизированы модели реологического поведения в условиях действия нормальных напряжений. Выделены три зоны на экспериментальных кривых  $F^* = f(h_i/R)$ , соответствующие состоянию структуры вязко-пластичных смесей. Предложен критерий пластичности  $K_i(I)$  для оценки предела ползучести системы  $\tau_k$  по модели Шведова. Цементные вязко-пластичные системы разделены на три типа: I, II и III, в зависимости от устойчивости структуры и способности к вязкопластическому течению. Автором установлено, что для обеспечения способности смеси к экструзии значения критерия пластичности  $K_i(I)$  должны составлять 1,0 - 2,0 кПа. Соискателем были самостоятельно разработаны методы оценки формоустойчивости смесей (тест на нагружение образца). Верификация технических методов проводилась методами сдвливающей реометрии как это принято в мировой практике.

Также автором установлена высокая корреляция между технологическими и реологическими характеристиками смесей для 3D-печати.

В **четвертой главе** представлены результаты исследований влияния технологических свойств смесей на качество 3D-печатных элементов. Автором проводился контроль технологических характеристик смесей и физико-механических свойств слоистых образцов. Для каждого напечатанного элемента оценивались деформации по вертикали и горизонтали с точностью 0,5 мм, по результатам чего был уточнен диапазон требований к технологическим характеристикам смесей для 3D-печати. Предлагается в зависимости от значения показателя текучести смеси разделить их на марки, использование которых зависит от типа принтера и его системы подачи и экструзии.

Установлено, что при рекомендованных соискателем значениях технологических характеристик обеспечивается устойчивость конструкции и отсутствие дефектов.

В **пятой главе** сформулированы требования к технологическим свойствам смесей для строительной 3D-печати. Автором разработана методика лабораторного и оперативного контроля технологических характеристик смесей. Апробация методик контроля проведена на принтерах двух типов с различными системами транспортировки и экструзии. Была предложена процедура и алгоритм контроля качества смеси на всех стадиях 3D-печати. Установлено, что внедрение процедуры контроля повысит эффективность 3D-печати за счет экономии времени, снижения затрат и потерь от брака.

В **заключении** диссертации представлены основные результаты, которые отражают итоги выполненного исследования, приводятся рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

7. **Автореферат** в полной мере отражает основное содержание диссертационной работы.

8. **Оценка публикаций автора.** По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в изданиях, индексируемых в базах данных БД Scopus и Web of Science. Получено 7 патентов РФ. Публикации в полном объеме отражают основные положения диссертации, что в сочетании с выступлениями на научных конференциях позволило пройти достаточную апробацию в научно-инженерной среде специалистов.

#### 9. **Замечания и рекомендации по диссертации**

1. Каким образом может измениться реологическое поведение цементных смесей при изменении видов суперпластификатора и минеральных наполнителей? Каким образом это будет отражаться на гибкости технологического процесса производства изделий?

2. В главе 4 при печати модельных и полноразмерных 3D-печатных конструкций не указаны временные интервалы между началом и концом печати, что не позволяет в полной мере оценить сохранность свойств смеси.

3. В главе 5 не подставлены характеристики строительных 3D-принтеров, хотя указано, что они между собой отличаются.

4. Требуется пояснение, чем обусловлена скорость 0,5 мм/с для оценки экструдированности? Для критериев формоустойчивости есть такое пояснение в виде расчёта нагрузок в приложении, а для экструдированности аналогичного пояснения нет.

Указанные выше замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе. Положения, выносимые на защиту, свидетельствуют о личном вкладе соискателя, а множество зарегистрированных патентов по результатам проведенных исследований подтверждают значимость полученных решений для практики.

#### 10. **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертационная работа Бабенко Дмитрия Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «**Разработка критериев и методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати**» представляет собой комплекс исследований, направленных на получение качественной и бездефектной продукции.

Диссертация содержит в полном объеме все разделы законченной научной работы: введение, анализ состояния вопроса, характеристики применяемых материалов и методов исследований, научную и практическую части, заключение,

список литературы, приложения, содержащие акты о внедрении результатов работы.

На основании анализа материалов, представленных в диссертации, можно заключить, что диссертация Бабенко Дмитрия Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «**Разработка критериев и методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати**» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой разработаны единые методы и критерии оценки качества бетонных смесей для строительной 3D-печати, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие технологических основ 3D-печати строительных материалов и по критериям актуальности, научной новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов, степени опубликования результатов исследований, их апробации, методическому уровню и редакционной подготовки удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Бабенко Дмитрий Сергеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5 Строительные материалы и изделия.

**Официальный оппонент:**

Доктор технических наук по специальности 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия», профессор, советник РААСН, декан факультета «Управления территориями» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»



Тараканов  
Олег Вячеславович

Тел.: +7 927 384 7264  
E-mail: tarov60@mail.ru

04.12.24г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Адрес университета: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28

