Строительные материалы и изделия

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-14>
УДК 666.9.03

Г.С. Славчева, Е.А. Бритвина, А.И. Ибряева

СЛАВЧЕВА ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА – д.т.н., профессор, AuthorID: 910549, SPIN: 4834-5942, ORCID: 0000-0001-8800-2657, ResearcherID: U-4421-2018, ScopusID: 57195684636, e-mail: gslavcheva@yandex.ru

БРИТВИНА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА – аспирант, AuthorID: 174467, SPIN: 2538-5440, ORCID 0000-0002-0462-4991, ResearcherID: B-9056-2019, ScopusID: 57197819710, e-mail: sos71@list.ru

Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций

ИБРЯЕВА АНАСТАСИЯ ИГОРЕВНА – инженер-исследователь, AuthorID: 1047596, SPIN: 2764-4957, ORCID 0000-0001-7059-8296, e-mail: n.oduvanchik@mail.ru

Высшая школа строительного материаловедения

(Научно-образовательный академический центр)

Воронежский государственный технический университет

20-летия Октября ул., 84, Воронеж, Россия, 394006

Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей

Аннотация: Работа посвящена обоснованию нового оперативного метода контроля реологических характеристик смесей для строительной 3D-печати – инновационного метода возведения строительных объектов. Для контроля реологических характеристик применялись сдвливающий и пенетрометрический тесты, по результатам которых определены структурная и пластическая прочности, а также оценка пластической прочности по сопротивлению пенетрации вязкопластичных смесей. Исследования проводились на цементных смесях различного компонентного состава, отличающихся по виду и гранулометрии наполнителя и виду модификаторов вязкости. Количественная оценка критериальных реологических свойств смесей для 3D-печати позволила выявить высокую меру корреляционной взаимосвязи между показателями структурной прочности, пластической прочности, определяемых при сдвливании, и пластической прочности, оцененной по величине сопротивления пенетрации. Независимо от характеристик компонентного состава смесей коэффициент корреляции данных показателей находится в диапазоне 0,85–0,95, что свидетельствует о наличии функциональной взаимосвязи между ними. Оценка пластической прочности по сопротивлению пенетрации может быть признана в качестве комплексной характеристики вязкопластических свойств смеси для 3D-печати в строительстве; апробированный авторами пенетрометрический метод предложен в качестве оперативного экспресс-метода контроля.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, строительная смесь, реологические характеристики смесей, сдвливающие тесты, пенетрометрический метод.

© Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Ибряева А.И., 2019

О статье: поступила: 13.11.2019; финансирование – работа выполнена по проекту 7.10781.2018/11.12 по государственному заданию «Выполнение проектов для получения первичных научных результатов, обеспечивающих расширение участия подведомственных образовательных организаций в реализации Национальной технологической инициативы».

Введение

Активное внедрение в строительную практику 3D-печати как инновационного метода возведения строительных объектов во многом зависит от возможности оперативного регулирования всех стадий процесса непосредственно на строительной площадке. Критериальными характеристиками смесей для 3D-печати являются показатели их экструдированности и формоустойчивости, определяемые вязкопластическими свойствами смеси, а именно вязкостью и показателями пределов текучести.

Для эффективной реализации процесса печати необходимо, с одной стороны, обеспечить достаточную пластичность (или текучесть) смеси для ее подачи к соплу экструдера и экструзию, с другой – смесь должна обладать достаточной прочностью в вязкопластичном состоянии для сохранения формы слоя непосредственно в момент печати и после нагружения его вышележащими слоями. Очевидно, что данные характеристики смесей для 3D-печати существенно отличаются от традиционных реологических свойств строительных смесей, в частности бетонных смесей.

В строительной практике нормируемыми реологическими характеристиками бетонных смесей являются подвижность, жесткость и вязкость, регламентируемые согласно требованиям ГОСТ Р 57345-2016 [3]. Но данные параметры характеризуют только текучесть бетонной смеси, при этом ни один из показателей не отвечает за ее способность держать форму, что делает их неприменимыми для оценки свойств смесей для строительной 3D-печати. Поэтому существует проблема обоснования комплексного показателя оценки вязкопластических свойств смесей для 3D-печати и метода его оперативного контроля.

Цель работы – обоснование нового универсального оперативного метода оценки реологических характеристик смесей для строительной 3D-печати.

Прежде всего нам необходимо решить следующие задачи:

- 1) дать количественную оценку критериальным реологическим свойствам смесей для 3D-печати;
- 2) оценить достоверность экспресс-метода контроля реологических свойств смесей для 3D-печати;
- 3) найти корреляционную зависимость результатов оценки критериальных реологических свойств смесей и экспресс-метода их контроля.

В настоящее время общепризнанным подходом к оценке реологических свойств смесей для 3D-печати является теория потока при сдавливании [9, 15]. С использованием данных подходов разработаны методы сдавливающей реометрии, к которым относятся сдавливающий [14], экструзионный [12] методы и тесты, позволяющие определить предел текучести смеси при сдавливании в условиях, моделирующих напряжения при экструзии. Данный показатель применяется в качестве комплексной характеристики экструдированности смесей. Метод оценки формоустойчивости был сформулирован и реализован в работах А. Perrot'a [13]. Показателем формоустойчивости, согласно данному методу, является предел текучести материала при действии напряжений при ступенчатом сдавливающем нагружении, определяемый в момент образования трещин в боковых гранях образца. Очевидно, что применяемые для характеристики экструдированности и формоустойчивости оценки пределов текучести при сдавливании получают при разных условиях реализации опыта. Поэтому они имеют разный физический смысл и разную величину.

Одновременно следует подчеркнуть, что данные методы неприменимы в построечных условиях, поскольку для их реализации требуется высокоточное специализированное оборудование. Для оперативного контроля качества смеси на строительной площадке необходим экспресс-метод, позволяющий по одному комплексному показателю оценить вязкопластические свойства смеси и, соответственно, их технологическую пригодность к 3D-печати.

Согласно положениям классической реометрии [5, 7, 8], таким показателем может быть пластическая прочность, которая является количественной характеристикой начала разрушения структуры вязкопластичных дисперсных систем. Для ее оценки известны и нор-

мированы методы для различных видов вязкопластичных смесей [1, 4, 11], такие как методы Vicat, Hitti и пенетрометрический. В российской практике пенетрометрический метод признан эффективным для контроля сроков схватывания бетонной смеси по изменению показателя пластической прочности во времени [2]. Но в [10] доказано, что именно пенетрометрический метод позволяет наиболее адекватно (по сравнению с Vicat и Hitti) оценить реологические характеристики смесей для 3D-печати.

Обоснование оперативного метода контроля основано на анализе и сопоставлении видов напряжений, возникающих в вязкопластичной системе при экструзии и послойной печати, с характеристиками данной системы, которые оцениваются по результатам различных типов лабораторных тестов (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление напряжений, возникающих в вязкопластичной системе при экструзии и послойной печати, и показателей лабораторных испытаний

Стадия 3D-печати	Напряжения, возникающие в смеси на разных стадиях печати	Физический смысл показателей, определяемых при реализации сдвигающих тестов	Физический смысл показателя, определяемого при пенетрометрическом испытании
Экструзия	Касательные и нормальные напряжения при сдавливании смеси в экструдере с заданной скоростью экструзии	Оценка текучести смеси при действии касательных и нормальных напряжений при сдавливании образца с постоянной скоростью деформирования	Оценка способности смеси сопротивляться действию касательных напряжений в зоне боковой поверхности плунжера и нормальных напряжений под плунжером
Послойная укладка	Нормальные напряжения при вертикальном нагружении предыдущего слоя последующими	Оценка способности смеси сопротивляться действию нормальных напряжений (сохранять форму, сохранять структуру) при нагружении с постоянно или ступенчато прирастающей нагрузкой	

Показатель пластической прочности, определяемый пенетрометрическим методом, наиболее близок по физическому смыслу к показателю формоустойчивости, определяемому при нагружении с постоянно или ступенчато прирастающей нагрузкой, так как оба показателя характеризуют момент нарушения целостности структуры при действии нормальных напряжений. Это дает основание для оценки возможностей применения пенетрометрического метода в качестве оперативного метода контроля вязкопластических характеристик смесей для 3D-печати.

Материалы и методы

Чтобы обосновать возможность использования пенетрометрии как универсального метода контроля, для проведения серии экспериментов нами выбраны смеси различного состава, существенно отличающиеся по дисперсности применяемых наполнителей и виду модификаторов вязкости. Компоненты смеси представлены в табл. 2, составы смесей – в табл. 3.

На первом этапе экспериментов проведена оценка реологических свойств исследуемых систем по методике сдавливающих тестов [6]. Для проведения испытаний использовались цилиндрические образцы вязкопластичной смеси размером $R = h_0 = 25$ мм. Образцы изготавливались непосредственно после перемешивания компонентов смеси. Каждый отдельный образец помещался между двумя гладкими пластинами.

Таблица 2

Характеристика сырьевых компонентов

Компоненты смесей	Характеристика компонента смеси
Портландцемент	ЦЕМ I 42,5 Н Минералогический состав: C ₃ S – 62%, C ₂ S – 13%, C ₃ A – 7,5%, C ₄ AF – 11,5%
Модификатор вязкости № 1	K ₄ P ₂ O ₇ + (C ₃₅ H ₄₉ O ₂₉) _n
Модификатор вязкости № 2	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
Микродисперсный наполнитель	CaCO ₃ , d=1–55 мкм
Заполнитель	SiO ₂ , d=160–630 мкм
Волокно	Полипропиленовая фибра
Вода	ГОСТ 23732-79. Вода для бетонов и растворов. Технические условия
Суперпластификатор	На основе поликарбоксилатных эфиров

Таблица 3

Содержание компонентов смеси по массе, %

Компонент	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4
Портландцемент	38,00–39,00	40,60–41,10	39,03–39,39	40,11–41,36
Модификатор вязкости № 1	–	–	0,14–0,18	0,17–0,25
Модификатор вязкости № 2	0,70–0,90	0,75–1,00	–	–
Микродисперсный наполнитель	–	41,25–41,50	–	41,36–42,44
Заполнитель	48,30–48,10	–	48,80–49,00	–
Волокно	0,20–0,26	0,17–0,25	0,18–0,27	0,17–0,25
Вода	11,30–11,40	16,10–16,20	16,10–16,20	16,30–16,58
Суперпластификатор	0,40–0,44	0,45–0,63	0,47–0,53	0,37–0,64

Сдавливающий тест проводился при постоянной скорости нагружения 0,5 Н/с, что отвечает средней скорости возрастания нагрузки при печати строительных объектов промышленно производимыми принтерами. Скорость нагружения определена нами исходя из расчета нагрузок от возрастания веса укладываемых слоев при печати здания заданного периметра: отдельных конструктивных элементов и элементов ландшафтного дизайна. Испытания производились до разрушения образцов, в процессе опытов фиксировались кривые «перемещение–время».

По результатам сдавливающего теста определялись следующие реологические характеристики, обоснованные нами в работе [6]:

- структурная прочность (σ_0) – способность вязкопластичной смеси сопротивляться действию сжимающих напряжений без деформирования, σ_0 рассчитывалась в точке кривой «перемещение–время», соответствующей началу деформирования;

- пластическая прочность ($\sigma_{пл}$) – предел сопротивления деформированию вязкопластичной смеси при действии сжимающих напряжений без разрушения структуры, рассчитывалась в точке кривой «перемещение–время», соответствующей началу трещинообразования.

Структурная и пластическая прочность определяются по формуле

$$\sigma = \frac{N}{\pi R^2}, \quad (1)$$

где N – нагрузка в соответствующей точке кривой «перемещение–время», кН; R – радиус образца, м.

Сдавливательные испытания проводились с использованием электромеханической испытательной системы INSTRON 5982 в Центре коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова ВГТУ.

На втором этапе эксперимента были определены характеристики смеси пенетрометрическим методом. В качестве испытательного прибора выбран пенетрометр Геороскет грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером $d = 6,4$ мм. Испытанию подвергалась свежеприготовленная смесь. Непосредственно после изготовления смесь укладывали в кольцо диаметром 150 мм и высотой 55 мм. Испытания производили, погружая плунжер пенетрометра до заданной риски, на глубину 5 мм. Количество выполненных измерений – 12 на каждый состав. По результатам испытаний оценку пластической прочности ($P_{пл}$) определяли как приведенную величину сопротивления пенетрации:

$$P_{пл} = \frac{4N}{\pi d^2}, \quad (2)$$

где N – сопротивление пенетрации смеси при погружении плунжера стандартного диаметра на глубину 5 мм, кН; d – диаметр плунжера, м².

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены диаграммы «перемещение–время», полученные по результатам сдавливающего теста.

Согласно полученным результатам сдавливающих тестов, для всех четырех систем независимо от их состава на кривых «перемещение–время» можно выделить аналогичные зоны:

1) в зоне 1 отсутствуют деформации, система воспринимает нагрузку без изменения формы, поведение смеси в момент окончания данной зоны можно оценить показателем структурной прочности (σ_0);

2) зона 2 – зона развития пластических деформаций без разрушения целостности структуры материала, момент завершения данной зоны характеризуется образованием первой трещины и соотносится с пластической прочностью ($\sigma_{пл}$);

3) зона 3 – зона интенсивного образования трещин в системе и полное разрушение целостности системы, что приводит к полной потере несущей способности смеси.

Рис. 1. Экспериментальные диаграммы «перемещение–время».

При испытаниях пенетрометром была определена прочность смеси, соответствующая сопротивлению пенетрации при погружении стандартного плунжера на глубину 5 мм.

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Реологические характеристики смесей

№	Наименование	σ_0 , кПа	$\sigma_{пл}$, кПа	$P_{пл}$, кПа	Коэф. корреляции $r_{P_{пл}\sigma_0}$	Коэф. корреляции $r_{P_{пл}\sigma_{пл}}$
1	Система 1	1,56	42,51	41,68	0,90	0,89
2	Система 2	3,10	35,80	36,28	0,93	0,90
3	Система 3	3,07	36,24	35,79	0,94	0,95
4	Система 4	1,77	40,42	40,45	0,85	0,86

По полученным нами результатам сдвливающих тестов и испытаний пенетрометром были построены корреляционные зависимости для структурной и пластической прочности всех исследуемых составов смесей (рис. 2). Установлено, что для всех исследованных составов между показателями структурной (σ_0) и пластической прочностей ($P_{пл}$), а также величинами пластической прочности $\sigma_{пл}$ и $P_{пл}$ имеется линейная корреляция. Коэффициент достоверности аппроксимации между экспериментальными значениями и линией регрессии характеризуется высокими значениями в диапазоне $R^2 = 0,71...0,86$.

Пластическая прочность $\sigma_{пл}$, определенная по результатам сдвливающего теста, и пенетрометрическая пластическая прочность $P_{пл}$ характеризуют момент начала разрушения структуры. Это обусловлено одинаковой работой материала при испытаниях. При испытаниях пенетрометром происходит нарушение целостности структуры материала плунжером при его погружении до заданной отметки, развитие нормальных напряжений под поверхностью плунжера и касательных напряжений по боковой поверхности. При сдвливающих тестах нарушение структуры происходит при трещинообразовании от развивающихся в системе нормальных и касательных напряжений. Поэтому закономерно, что независимо от состава смесей величины $\sigma_{пл}$ и $P_{пл}$ практически совпадают, разница значений между ними не превышает 2%.

Структурная прочность σ_0 , определенная по результатам сдвливающего теста, и пенетрометрическая пластическая прочность $P_{пл}$ не совпадают по абсолютным значениям. Это обусловлено разницей в физическом смысле данных характеристик. Как показано ранее, величина σ_0 характеризует способность сохранять целостность структуры и не деформироваться при нагружении, а прочность $P_{пл}$ определяется как результат сопротивления пенетрации и характеризует момент нарушения структуры вязкопластичной системы. Однако важно подчеркнуть, что характеристики σ_0 и $P_{пл}$ также имеют линейную корреляцию. Для всех исследованных систем коэффициент корреляции между данными показателями составляет $r_{P_{пл}\sigma_0} = 0,85 - 0,94$.

Следует подчеркнуть, что состав смесей не оказывает влияния на степень корреляции между показателями $\sigma_{пл}$ и $P_{пл}$, а также σ_0 и $P_{пл}$.

Заключение

1. Анализ и сопоставление видов напряжений, возникающих в вязкопластичной системе при экструзии и послойной печати, с характеристиками данной системы, которые оцениваются по результатам различных типов лабораторных тестов, позволил обосновать возможность применения пенетрометрического метода в качестве оперативного метода контроля формоустойчивости смесей для строительной 3D-печати. Данная характеристика является критериальной для процесса послойной укладки и характеризует способность вязкопластичной смеси сохранять форму в слое в момент печати и воспринимать нагрузку вышеукладываемых слоев без деформирования и трещинообразования.

Рис. 2. Диаграммы корреляции между показателями пластической прочности, определенные по результатам сдвливающего ($\sigma_{пл}$, σ_0) и пенетрометрического тестов ($P_{пл}$): а – система 1; б – система 2; в – система 3; г – система 4.

2. Количественная оценка критериальных реологических свойств смесей для 3D-печати позволила выявить высокую меру корреляционной взаимосвязи между показателями структурной прочности (σ_0), пластической прочности ($\sigma_{пл}$), определяемых при сдавливании, и пластической прочностью ($P_{пл}$), определяемой пенетрометрическим методом. Независимо от характеристик компонентного состава смесей коэффициент корреляции между данными показателями находится в диапазоне 0,85–0,95, что свидетельствует о наличии функциональной взаимосвязи между ними.

3. Величина пластической прочности $P_{пл}$ может быть признана в качестве комплексной характеристики формоустойчивости смеси для 3D-печати, а пенетрометрический тест предложен в качестве оперативного экспресс-метода контроля вязкопластических свойств на стадии послойной укладки.

4. Развитие исследований связано с обоснованием комплекса реологических свойств смесей и методов их контроля для всех стадий процесса печати, что необходимо для создания нормативной базы для 3D-печати в строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка; введ. 2002-03-01. М.: Госстрой России, 2001. 30 с.
2. ГОСТ Р 56587-2015. Смесей бетонные. Метод определения сроков схватывания; введ. 2016-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.
3. ГОСТ Р 57345-2016 / EN 206-1:2013. Бетон. Общие технические условия; введ. 2017-07-01. М.: Стандартинформ, 2017. 75 с.
4. Европейский стандарт EN 1015-4:1998. Растворы строительные для каменной кладки. Методы испытаний. Ч. 4. Определение консистенции свежего строительного раствора (с помощью пенетromетра). Перевод выполнен: 07.02.2011. М., 2011. 11 с.
5. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
6. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 30–35.
7. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем. М.: Химия, 1988. 256 с.
8. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высш. школа, 2007. 444 с.
9. Engmann J., Servais C., Burbidge A.S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. J. of Newtonian Fluid Mechanics. 2005(1–3);132:1–27.
10. Lootens D., Joussett O., Matinier L., Roussel N., Flatt R. J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration test. J. Cement and Concrete Research. 2009(5);39:401–408.
11. Österreichische Richtlinie zu Innenschalenbeton. Wien/A, Dezember 2012, 90 S. URL: https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_oesterreichische_Richtlinie_zu_Innenschalenbeton_1795761.html – 11.10.2019.
12. Perrot A., Rangeard D., Micaelli F. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behavior of high yield stress fluids at low strain rate, J. Rheologica Acta, Springer Verlag. 2012(8);51:743–754.
13. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. J. Materials and Structures. 2016;49:1213–1220.
14. Russel N., Lanos C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. J. Applied Reology. 2003(3);13:3–5.
15. Toutou Z., Roussel N., Lanos C. The squeezing test: A tool identify firm cement-based material's rheological behavior and evaluate their extrusion ability. J. Cement and Concrete Research. 2005(10);35:1891–1899.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-14>

Slavcheva G., Britvina E., Ibryaeva A.

GALINA SLAVCHEVA, Doctor of of Engineering Sciences, Professor, AuthorID: 910549, SPIN: 4834-5942, ORCID: 0000-0001-8800-2657, ResearcherID: U-4421-2018, ScopusID: 57195684636, e-mail: gslavcheva@yandex.ru

EKATERINA BRITVINA, Postgraduate, AuthorID: 174467, SPIN: 2538-5440, ORCID 0000-0002-0462-4991, ResearcherID: B-9056-2019, ScopusID: 57197819710, e-mail: sos71@list.ru

Department of Technology of Building Materials, Products and Constructions

ANASTASIYA IBRYAEVA, Engineer-Researcher

AuthorID: 1047596, SPIN: 2764-4957, ORCID 0000-0001-7059-8296,

e-mail: n.oduvanchik@mail.ru

Higher School of Building Materials Science (Scientific and Educational Academic Center)
Voronezh State Technical University

84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, Russia, 394006

3D-build printing: the operational method for verifying the cement mixture properties

Abstract: The work is devoted to the substantiation of the operational method for verifying the rheological characteristics of mixtures for 3D-build printing. To evaluate them, we used the squeezing and penetrometric tests, which were used to evaluate the structural strength, plastic strength, penetration resistance strength (plastic strength value) of viscous-plastic mixtures. The studies were carried out on cement mixtures of various component compositions, differing in the type and granulometry of the filler and the type of viscosity modifiers. A quantitative assessment of the criterion rheological properties of the 3D-printable mixtures revealed a high measure of the correlation interrelation between the structural strength, plastic strength, determined by squeezing test, and plastic strength value, determined by the penetrometric method. Regardless of the characteristics of the component composition of the mixtures, the correlation coefficient between these indicators is in the range of 0.85-0.95, which corresponds to the presence of a functional relationship between them. The value of the plastic strength value can be recognized as a complex characteristic of the visco-plastic properties of the 3D-printable mixture, and the penetrometric test is proposed as an operational express control method.

Keywords: 3D-printing, build mixture, squeezing test, rheological properties, penetrometric method.

REFERENCES

1. GOST 30744-2001. Cements. Test Methods with Polyfraction Sand Testing; 2002-03-01. M., Gostroy of Russia, 2001. 30 p.
2. GOST R 56587-2015. Concrete mixtures. Method for determination of time of setting; 2016-04-01. M., Standartinform, 2016. 8 p.
3. GOST R 57345-2016 / EN 206-1:2013. Concrete. General specifications. 2017-07-01. M., Standartinform, 2017. 75 p.
4. EN 1015-4:1998. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk. Teil 7. Bestimmung der konsistenz von frischörtel (mit eindringgerät). Deutsche Fassung, 9 p.
5. Rebinder P.A. Selected Works. Surface phenomena in disperse systems. Physicochemical mechanics. M.: Publishing Science, 1979, 384 p.

6. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Construction Materials*. 2018; 12:30–35.
7. Uryev N.B. *Physicochemical principles of dispersed systems technology*. M.: Chemistry, 1988. 256 p.
8. Schukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. *Colloid chemistry*. M.: Higher school, 2007. 444 p.
9. Engmann J., Servais C., Burbidge A.S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: a review, *J. of Newtonian Fluid Mechanics*. 2005(1–3);132:1–27.
10. Lootens D., Joussett O., Matinie L., Roussel N., Flatt R. J. Yield stress during setting of cement pastes from penetration test. *J. Cement and Concrete Research*. 2009(5);39:401–408.
11. Österreichische Richtlinie zu Innenschalenbeton. Wien/A, Dezember 2012, 90 S. URL: https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_oesterreichische_Richtlinie_zu_Innenschalenbeton_1795761.html– 11.10.2019.
12. Perrot A., Rangeard D., Micaelli F. et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate. *J. Rheologica Acta*, Springer Verlag. 2012(8); 51:743–754.
13. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural build-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *J. Materials and Structures*. 2016; 49:1213–1220.
14. Russel N., Lanos C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. *J. Applied Reology*. 2003(3);13:3–5.
15. Toutou Z., Roussel N., Lanos C. The squeezing test: a tool identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability. *J. Cement and Concrete Research*. 2005(10); 35:1891–1899.