

УДК 544.77:546.62-31

М. А. Трубицын, Л. В. Фурда, Н. А. Воловичева, В. В. Лисняк
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет (Российская Федерация)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЛОКУЛЯНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СУСПЕНЗИЙ α -ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Проведены сравнительные исследования эффективности различных коммерчески доступных полифосфатов и поликарбоксилатных эфиров, использованных в качестве дефлокулянтов водных суспензий реактивного глинозема. Тонкодисперсный α -оксид алюминия приготовлен сухим помолом кальцинированного глинозема. Полученный порошок имеет медианный диаметр частиц $D_{50} = 2,4$ мкм, $S_{уд}$ (БЭТ) = $1,4$ м²/г. Дозировка поликарбоксилатных эфиров в суспензиях составляла 0,17 и 0,34 мас. %, а полифосфатов – 0,10 и 0,25 мас. % от массы порошка реактивного глинозема. Все дефлокулированные суспензии в диапазоне скоростей сдвига менее 20 с⁻¹ могут быть охарактеризованы как неньютоновские структурированные жидкости, имеющие определенный предел текучести τ_0 . При увеличении скорости сдвига выше 20 с⁻¹ значения кажущейся вязкости всех исследованных суспензий существенно уменьшаются, а зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$ становятся прямолинейными. Измеренные кривые течения $\tau = f(\dot{\gamma})$ удовлетворительно аппроксимировались моделью Кэссона. Рассчитанные значения предела текучести τ_0 позволили дать сравнительную оценку степени флокуляции суспензий с добавками различных дисперсантов.

Количество затворяемой воды в значительной мере оказывает воздействие на текучесть суспензий реактивного глинозема. Для образца, дефлокулированного добавкой на основе поликарбоксилатного эфира Синтефлору ДМ50 0,17 мас. %, уменьшение содержания твердой фазы от 84 до 78% повышает текучесть суспензии примерно в 4 раза.

Ключевые слова: α -оксид алюминия, суспензии, текучесть, реология, дефлокулянты.

Для цитирования: Трубицын М. А., Фурда Л. В., Воловичева Н. А., Лисняк В. В. Исследование влияния дефлокулянтов на реологическое поведение суспензий α -оксида алюминия // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 165–174.

M. A. Trubitsyn, L. V. Furda, N. A. Volovicheva, V. V. Lisnyak
Belgorod National Research University (Russian Federation)

STUDE OF EFFECT OF DEFLOCCULANTS ON THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF α -ALUMINA SUSPENSIONS

Comparative studies have been carried out on the effectiveness of various commercially available polyphosphates and polycarboxylate esters used as deflocculants in aqueous suspensions of reactive alumina. Finely dispersed alpha-alumina is prepared by dry grinding of calcined alumina. The resulting powder has a median particle diameter of $D_{50} = 2.4$ microns, S (BET) = 1.4 m²/g. The dosage of polycarboxylate esters in suspensions was 0.17 and 0.34 wt.%, and polyphosphates – 0.10 and 0.25 wt.% by weight of reactive alumina powder. All deflocculated suspensions in the shear rate range of less than 20 s⁻¹ can be characterized as non-Newtonian structured liquids having a certain yield strength of τ_0 . With an increase in the shear rate above 20 s⁻¹, the values of the apparent viscosity of all the suspensions studied decrease significantly, and the dependences of $\tau = f(\dot{\gamma})$ become rectilinear. The measured flow curves $\tau = f(\dot{\gamma})$ were satisfactorily approximated by the Casson model. The calculated values of the yield strength τ_0 allowed us to give a comparative assessment of the degree of flocculation of suspensions with additives of various dispersants. The amount of shut-in water significantly affects the fluidity of reactive alumina suspensions. For a sample deflocculated with an additive based on polycarboxylate ether Sinteflour DM50 0.17 wt.%, a decrease in the solid phase content from 84 to 78% increases the fluidity of the suspension by about 4 times.

Key words: α -aluminum oxide, suspensions, flowability, rheology, deflocculants.

For citation: Trubitsyn M. A., Furda L. V., Volovicheva N. A., Lisnyak V. V. Study of effect of deflocculants on the reological behavior of α -alumina suspensions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 2 (259), pp. 165–174 (In Russian).

Введение. Известно, что в отличие от других кристаллических модификаций оксида алюминия, наиболее термодинамически стабильной является α - Al_2O_3 . Благодаря своим превосходным физико-механическим свойствам и биосовместимости α -оксид алюминия широко используется для получения имплантатов, а также высококачественной оптической керамики, монокристаллического алюмоиттриевого граната и лейкосапфира. Последний служит исходным материалом при производстве подложек микросхем, светодиодов и др. Оксид алюминия высокой чистоты используется в производстве износостойких стекол для авиа- и ракетостроения, изготовления химически- и температуростойких конструкционных элементов [1, 2].

Важной областью применения α -глинозема является производство технической и специальной корундовой керамики. Снижение температуры спекания может быть достигнуто двумя основными подходами. Первый связан с применением модифицирующих добавок разного типа и эвтектидных смесей. Вторым перспективным подходом является использование тонкодисперсных и ультрадисперсных порошков α - Al_2O_3 , которые в общепринятой терминологии называют реактивными глиноземами (reactive alumina) [3, 4].

Такие материалы диспергированы до размера первичных кристаллов (0,5–2,0 мкм), а значительная доля частиц (20–50%) имеет размер менее 1 мкм. Структурная и поверхностная активность реактивных глиноземов определяется дефектностью кристаллического строения, размером и формой частиц, что обуславливает уменьшение энергии активации спекания [5, 6]. Как следствие, такие порошки легко спекаются до максимальной плотности при температурах на 100–200°C ниже, чем грубодисперсные. Субмикронные активированные глиноземистые порошки обеспечивают необходимую совокупность технологических и физико-механических свойств разных видов плотной корундовой керамики [7–9].

При массовом выпуске корундовой керамики наиболее часто применяют литье под давлением из пластифицированного парафином шликера; прессование порошкообразных масс в разных вариантах [10]. С учетом разнообразия, сложности форм и размеров корундовых изделий наиболее рациональной технологией их изготовления является шликерное литье в гипсовые формы [8]. Свойства изделий, получаемых данным методом, зависят от размера частиц глиноземистых порошков и их содержания в суспензии. Как правило, наличие более мелких частиц и более высокая концентрация суспензии в конечном итоге приводят к улучшению свойств изделия. Литейный

шликер должен обладать хорошей и практически постоянной текучестью, сохранять седиментационную и агрегатную устойчивость. Однако высокие концентрации суспензии и наличие субмикронных частиц обуславливают усиление взаимодействия между частицами, что значительно увеличивает вязкость и затрудняет литье суспензии в гипсовую форму [11–13]. Если шликер не обладает седиментационной устойчивостью, то его частицы под действием гравитационных сил осаждаются. Это может стать причиной появления разнотолщинности отливок по высоте и возникновения неоднородности по гранулометрическому составу [8].

Получение суспензии со стабильными реотехнологическими свойствами, не содержащими агломератов, является одним из основных требований при шликерном литье. Важный фактор, обеспечивающий достижение хороших характеристик литьевых шликеров, – использование дефлокулянтов. Как следствие, многие работы направлены на изучение влияния различных видов и количеств диспергирующих добавок на реотехнологические свойства водных суспензий, а также характеристики изделий корундовой керамики [14, 15].

В технологии приготовления корундовых шликеров применяют достаточно широкий спектр различных диспергаторов. Известно использование в качестве дефлокулянтов растворов аммонийных солей полиметакриловой [16, 17] и полиакриловой кислот [14, 15, 18], акрилового сополимера (марка Displex A40) полиметакриловой кислоты [19], смеси гуммиарабика и натрия карбоксиметилцеллюлозы [20].

Так, в работе [16] изучено реологическое поведение водных суспензий мелкозернистого ($D_{50} = 0,2$ мкм) оксида алюминия при различном содержании твердого вещества с добавкой 0,26 мас. % полиметакрилата аммония для обеспечения устойчивого состояния дисперсии. Установлено, что максимальная доля упаковки составляет 40 об. %, а это соответствует коллоидной стабильности суспензии.

Известно использование в качестве диспергаторов водных растворов полиметакрилата аммония (Darvan C-N), динатриевой соли 4,5-дигидрокси-1,3-бензолдисульфоновой кислоты (Tigon) и лимонной кислоты. Количество диспергаторов варьировали в пределах 0,10–1,25 мас. %. Суспензии демонстрируют псевдопластическое поведение. Наилучший эффект показала добавка Tigon, так как для стабилизации 70 мас. % суспензии Al_2O_3 требовалось всего 0,1 мас. %. Авторы отмечают, что лимонную кислоту также возможно использовать в качестве коммерческого диспергатора, так как она способна хорошо стабилизировать выбранную систему и является более доступной и

экологичной по сравнению с изученными дефлокулянтами [17].

Tomasika P. и др. изучали дефлокуляцию коммерческого α -оксида алюминия (удельная поверхность $8,5 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер частиц $0,4 \text{ мкм}$) с помощью ряда органических соединений: хлорид тетраалкиламмония и его гидроксид, метиленовый синий и фенолы, моно- и поликарбоновые кислоты, флуоресцеин натрия, гидроксиды тетраалкиламмония, малахитовый зеленый и мальтодекстрин. Показано, что в случае недиссоциирующих макромолекул электростатические взаимодействия между частицами минимальны, а сорбция является основным фактором, влияющим на реологию [21].

Также известно использование полифосфатных дефлокулянтов в качестве разжижающих добавок суспензий глинозема [22]. Однако данных по применению диспергирующих агентов на основе поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ) практически не имеется [23].

Установлено, что ПКЭ имеют гребенчатую структуру и состоят из основной поликарбоксильной цепи, а также боковых полиэфирных цепочек. Наличие ионного заряда основной цепи необходимо для адсорбции поликарбоксилата на поверхности минеральных частиц и создания электростатического эффекта, а боковые цепочки макромолекулы полимера обеспечивают стерический эффект диспергирования [23]. Эффективность дисперсантов на основе ПКЭ зависит от плотности заряда основной цепи, а также от химической структуры, длины и количества боковых цепочек [24].

В настоящей работе проведены сравнительные исследования эффективности различных дефлокулянтов на реологические свойства водных суспензий реактивного α -глинозема.

Основная часть. Тонкодисперсный реактивный глинозем (далее РГ) для данной работы был приготовлен сухим помолом кальциниро-

ванного глинозема по технологии, приведенной в статье [25]. Информация о физико-химических свойствах исходных материалов представлена в табл. 1 и 2.

В качестве коммерческих дисперсантов использовали два вида полифосфатов – триполифосфат натрия (ТПФ) и гексаметафосфат натрия (ГМФ), а также три вида добавок на основе поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ) – Peramin AL200 и Peramin AL300 (Kerneos, Франция), Синтефлюу ДМ50 (далее по тексту ДМ50) (Синтез ОКА, Россия).

Суспензии РГ готовили следующим образом. Навески порошков, рассчитанные с учетом получения объема суспензии не менее 150 см^3 , переносили в пластиковый стакан и перемешивали в течение 1 мин. Далее добавляли требуемое количество дистиллированной воды с растворенным дефлокулянтом и перемешивали при помощи ручного миксера 3 мин до получения гомогенной суспензии.

В настоящей работе дозировка ПКЭ составляла $0,17$ и $0,34 \text{ мас. \%}$, а полифосфатов – $0,10$ и $0,25 \text{ мас. \%}$ от массы порошка РГ. Дефлокулянты Peramin AL200 и Peramin AL300 всегда добавляли в соотношении $1 : 1$ (далее по тексту – Peramin). В случае полифосфатных дефлокулянтов всегда добавляли $0,1 \text{ мас. \%}$ лимонной кислоты.

Реологическое поведение водных суспензий изучали при помощи ротационного вискозиметра Visco Star plus (Fungilab, Испания) в диапазоне скоростей сдвига от 5 до 100 с^{-1} .

Текучесть суспензий РГ оценивали посредством определения времени истечения 100 мл суспензии на вискозиметре Энглера с выходным отверстием $5,4 \text{ мм}$. Перед испытанием суспензию перемешивали стеклянной палочкой, переливали в сосуд вискозиметра и выдерживали в состоянии покоя в течение 30 с .

Таблица 1

Химический состав применяемых материалов

Материалы	Массовая доля, %						
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	Na_2O	Другие
Кальцинированный глинозем	87,42	6,94	1,67	1,20	2,00	0,12	0,65
РГ	99,68	0,02	0,03	0,02	–	0,12	0,13

Таблица 2

Физические характеристики реактивного глинозема

Материалы	Гранулометрический состав					Фазовый состав
	D_{90} , мкм	D_{50} , мкм	D_{20} , мкм	$< 1 \text{ мкм}$, %	$S_{уд}$ (БЭТ), $\text{м}^2/\text{г}$	
РГ	8,3	2,4	0,9	22,5	1,4	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

После этого открывали выпускное отверстие и по секундомеру фиксировали время истечения 100 мл суспензии – F_0 . Выполняли не менее трех параллельных измерений. Аналогичные испытания проводили для суспензии после выдержки в вискозиметре в течение 30 мин и определяли вторую текучесть F_{30} . Индекс загустеваемости (K_3) рассчитывали по формуле:

$$K_3 = \frac{F_{30}}{F_0}.$$

На первом этапе проведена оценка влияния различных дефлокулянтов на текучесть водных суспензий реактивного глинозема с содержанием твердого вещества 80 мас. %. Результаты исследований текучести суспензий РГ в присутствии дефлокулянтов представлены на рис. 1, а.

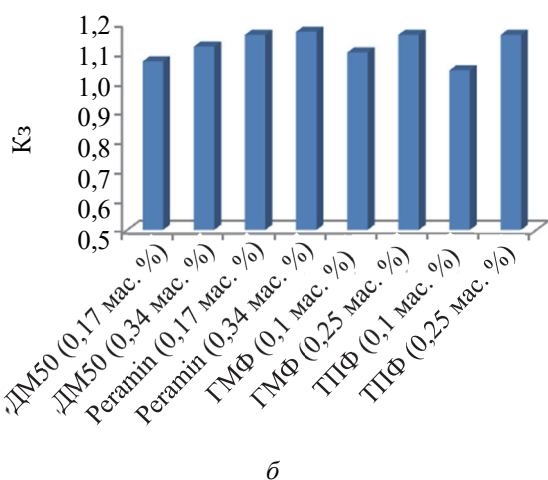
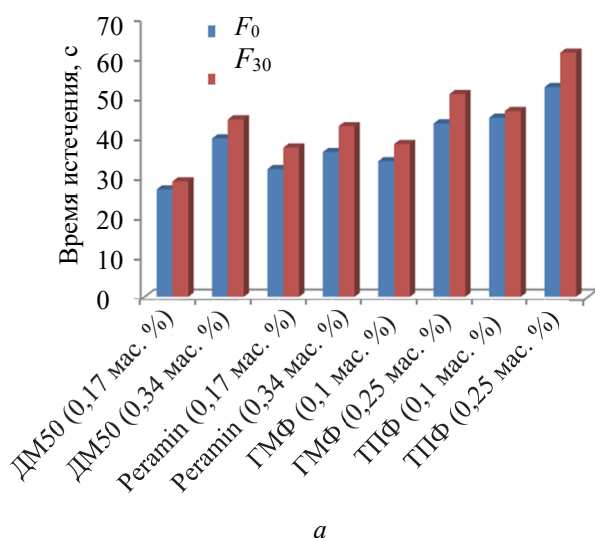


Рис. 1. Влияние различных дефлокулянтов на текучесть (а) и коэффициент загустеваемости (б) водных суспензий реактивного глинозема (содержание твердого вещества 80 мас. %)

В качестве эталона принята текучесть суспензии РГ без дефлокулянта, для которой значения F_0 и F_{30} равны соответственно 211,9 с и 377,8 с ($K_3 = 1,78$). Введение добавок полифосфатных и поликарбоксилатных дефлокулянтов улучшает текучесть суспензий РГ в 4–8 раз.

Из полифосфатных дефлокулянтов наибольший эффект проявляет ГМФ. Следует отметить, что для ГМФ и ТПФ увеличение количества вводимых добавок не оказывает заметного воздействия на текучесть образцов. Так, для ГМФ с концентрацией 0,10 и 0,25 мас. % показатель F_0 имеет значения 34 и 44 с соответственно.

В целом добавки поликарбоксилатных эфиров показали большую эффективность по сравнению с полифосфатами. Максимальный и сопоставимый эффект улучшения текучести был достигнут при использовании ПКЭ ДМ50 и Peramin с концентрацией 0,17 мас. % – 27 с и 32 с соответственно. Следует отметить близость к единице значений K_3 для всех испытанных видов дефлокулянтов (рис. 1, б). Это свидетельствует о реологической стабилизации водных суспензий РГ в течение 30 мин экспозиции.

На следующем этапе работы оценивалось реологическое поведение водных суспензий реактивного глинозема. Реологические кривые зависимостей $\eta = f(\dot{\gamma})$ и $\tau = f(\dot{\gamma})$, отражающие влияние дефлокулянтов ГМФ, ТПФ, Peramin и ДМ 50, представлены на рис. 2.

Согласно данным рис. 2, все дефлокулированные суспензии по своему реологическому поведению являются неньютоновскими жидкостями и проявляют псевдопластический тип течения. Максимальные значения кажущейся вязкости (η) зафиксированы в интервале низких значений скоростей сдвига $5\text{--}10\text{ с}^{-1}$. При $\dot{\gamma} = 5\text{ с}^{-1}$ величина η находится в диапазоне $520\text{--}1170\text{ мПа}\cdot\text{с}$ и $185\text{--}360\text{ мПа}\cdot\text{с}$ для образцов с добавками полифосфатов и ПКЭ соответственно. Полученные реологические кривые $\eta = f(\dot{\gamma})$ и минимальные значения вязкости суспензий РГ при оптимальной концентрации ТПФ и ГМФ 0,1 мас. % хорошо согласуются с данными работы [26]. Увеличение концентрации всех видов дефлокулянтов, как правило, приводит к возрастанию вязкости.

При увеличении скорости сдвига выше 20 с^{-1} значения кажущейся вязкости всех исследованных суспензий существенно уменьшаются, а зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$ становятся прямолинейными. При скорости сдвига 100 с^{-1} значения μ дефлокулированных суспензий реактивного глинозема находятся в диапазоне $90\text{--}130\text{ мПа}\cdot\text{с}$.

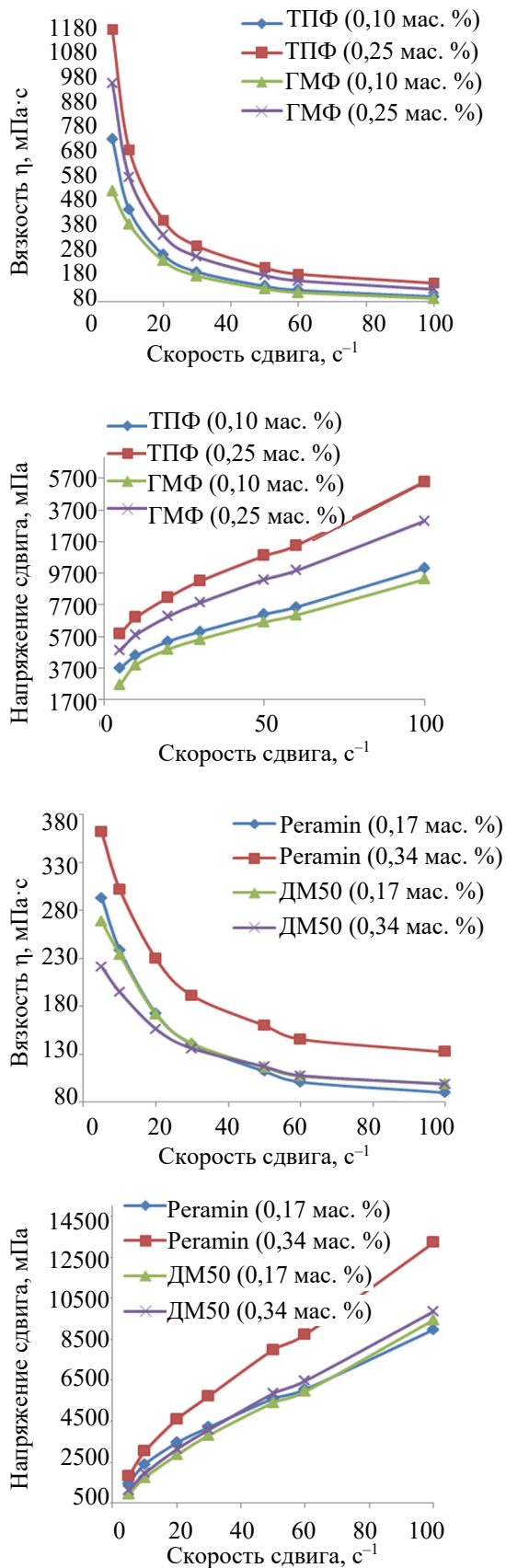


Рис. 2. Влияние исследуемых дефлокулянтов на реологическое поведение суспензий реактивного глинозема

На наш взгляд, эффективность дефлокулирующего действия различного типа диспергирующих агентов лучше всего оценивать по величине значения предела текучести τ_0 как параметра, характеризующего степень флокуляции глиноземистых суспензий в состоянии покоя. Для изучаемых суспензий величина τ_0 наиболее корректно рассчитывается с применением модели Кэссона [18, 19]. Уравнение модели Кэссона имеет вид

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta_p \gamma)^{1/2},$$

где τ – напряжение сдвига; γ – скорость сдвига; τ_0 – предел текучести; η_p – пластическая вязкость в диапазоне высоких скоростей сдвига.

Экспериментальные кривые зависимостей $\tau = f(\gamma)$, представленные на рис. 2, были обработаны согласно модели Кэссона, достоверность аппроксимации $R^2 > 0,99$ (рис. 3).

Как следует из рис. 3, максимальные значения τ_0 отмечаются у суспензий реактивного глинозема, диспергированных при помощи полифосфатных добавок (2045–4000 мПа). При увеличении количества полифосфатов с 0,10 мас. % до 0,25 мас. % τ_0 возрастает примерно в 1,6 раза. Наименьший предел текучести из выбранных двух добавок полифосфатов наблюдается у ГМФ с концентрацией 0,1 мас. %.

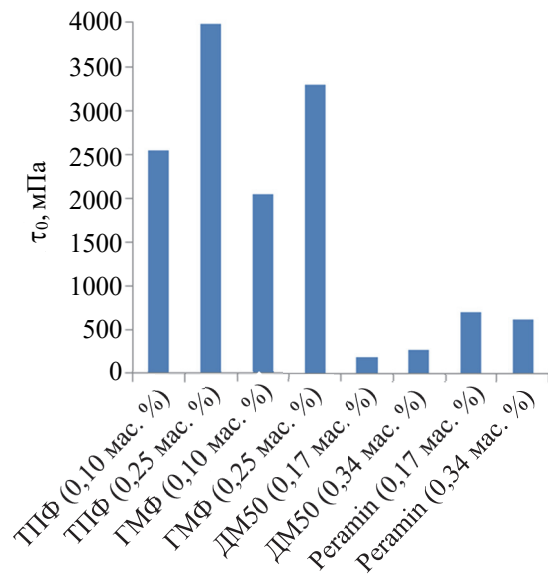


Рис. 3. Влияние содержания дефлокулянтов на τ_0 суспензий реактивного глинозема (содержание твердого вещества 80 мас. %)

Оценка реологических свойств суспензий РГ, дефлокулированных добавками поликарбонатных эфиров, показала высокую эффективность этого типа диспергирующих агентов. В случае добавок ПКЭ величина τ_0 в этих же суспензиях составляет 200–700 мПа (ДМ50 и Перамин

соответственно), что гораздо ниже, чем при использовании полифосфатов. При увеличении концентрации ДМ50 и $\text{Pegamin } \tau_0$ изменяется незначительно.

Таким образом, дисперсанты на основе поликарбоксилатных эфиров более эффективно понижают степень флокуляции суспензий РГ по сравнению с полифосфатами.

С учетом наилучшего дефлокулирующего действия добавки ДМ50 в количестве 0,17 мас. % на завершающем этапе было исследовано реологическое поведение суспензий реактивного глинозема с различным содержанием твердой фазы. Результаты представлены на рис. 4 и 5.

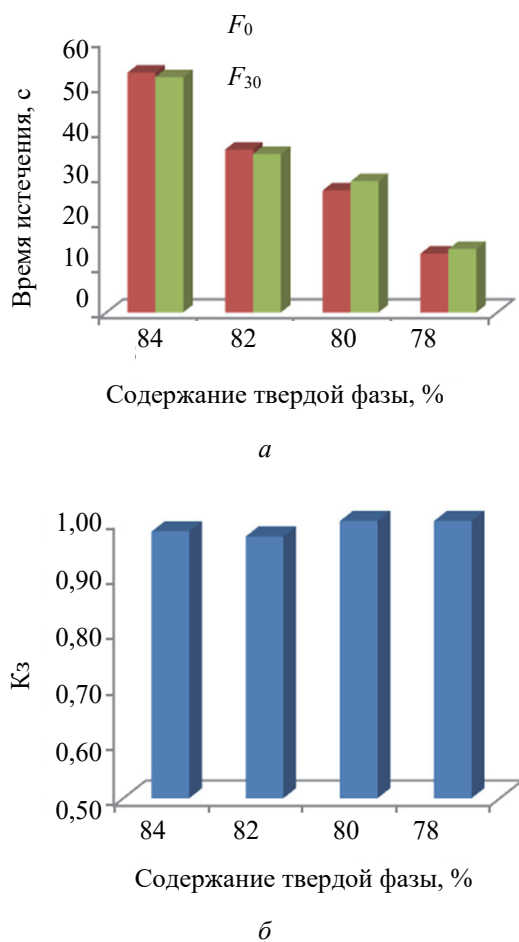


Рис. 4. Влияние содержания твердой фазы на текучесть водных суспензий РГ с добавкой ДМ50 0,17 мас. %:
а – текучесть; б – коэффициент загустеваемости

Количество воды в значительной мере оказывает воздействие на текучесть суспензий реактивного глинозема с добавкой ДМ 0,17 мас. % (рис. 4). Уменьшение содержания твердого вещества от 84 до 78 мас. % повышает текучесть примерно в 4 раза. Следует отметить, что индекс

загустеваемости варьируется в достаточно узком интервале близких к единице значений: 1,08–0,98 для всех исследуемых образцов.

Также изучалось реологическое поведение реактивного глинозема в интервале содержания твердого вещества 84–78 мас. % (рис. 5)

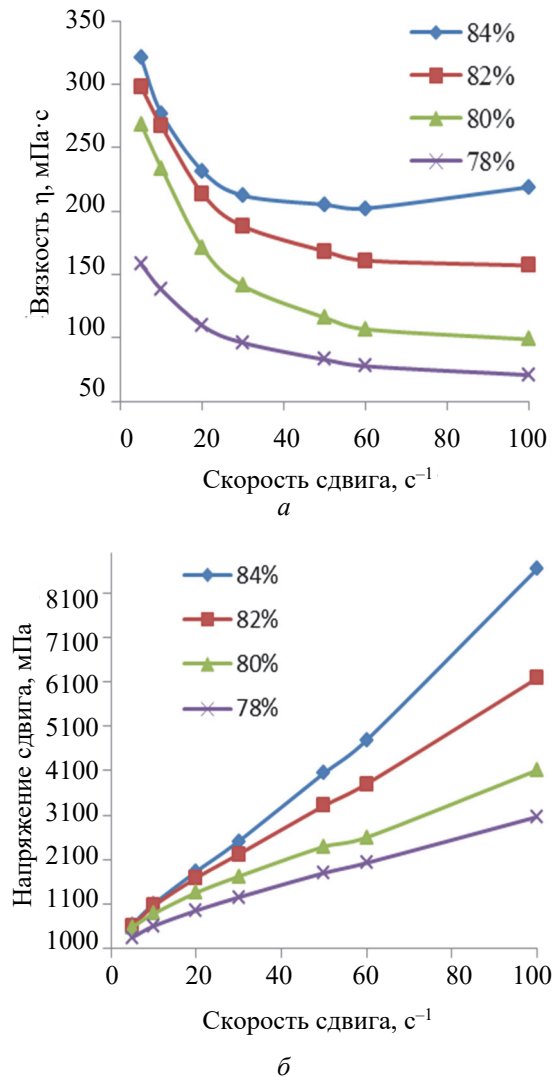


Рис. 5. Влияние содержания твердой фазы на реологическое поведение суспензий реактивного глинозема с добавкой ДМ50 0,17 мас. %

Исследуемые суспензии являются неньютоновскими жидкостями, в которых частицы твердой фазы, взаимодействуя между собой, образуют слабую твердую структуру. Разрушение этой структуры требует определенного количества напряжения и если это напряжение убрать, то частицы снова объединятся. С увеличением количества молекул воды в системе расстояние между частицами твердой фазы увеличивается, взаимодействие между ними становится меньше, и как следствие – система становится менее вязкой.

Для всех исследуемых образцов максимальные значения η фиксируются при значении скорости сдвига 5 с^{-1} и равны 321, 298, 268, 158 мПа·с для суспензий с содержанием твердой фазы 84, 82, 80 и 78 мас. % соответственно. Наблюдается уменьшение вязкости с увеличением влажности образцов. При скорости сдвига 20 с^{-1} и выше значения кажущейся вязкости всех исследованных суспензий существенно уменьшаются. При скорости сдвига 100 с^{-1} значения η дефлокулированных суспензий различной влажности находятся в диапазоне 70–218 мПа·с. Наблюдается прямолинейная зависимость $\tau = f(\dot{\gamma})$ для всех исследуемых образцов.

Заключение. Применение реологических методов позволило оценить влияние типа и концентрации коммерчески доступных полифосфатных и поликарбоксилатных добавок на эффективность дефлокуляции водных суспензий реактивного глинозема.

Все дефлокулированные суспензии в диапазоне скоростей сдвига менее 20 с^{-1} могут быть охарактеризованы как неньютоновские структурирован-

ные жидкости, имеющие определенный предел текучести τ_0 . При увеличении скорости сдвига выше 20 с^{-1} значения кажущейся вязкости всех исследованных суспензий существенно уменьшаются, а зависимости $\tau = f(\dot{\gamma})$ становятся прямолинейными. Измеренные кривые течения $\tau = f(\dot{\gamma})$ удовлетворительно аппроксимировались моделью Кэссона. Рассчитанные значения предела текучести τ_0 позволили дать сравнительную оценку степени флокуляции суспензий с добавками различных дисперсантов.

Количество затворяемой воды в значительной мере оказывает воздействие на текучесть суспензий реактивного глинозема. Для образца, дефлокулированного добавкой ДМ50 0,17 мас. %, уменьшение содержания твердой фазы от 84 до 78% повышает текучесть примерно в 4 раза.

Работа выполнена в НИУ БелГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения от 14.12.2020 г. № 075-11-2020-038 согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г. № 218.

Список литературы

1. Penn S., Alford N. Ceramic dielectrics for microwave applications // Handbook of low and high dielectric constant materials and their applications. San Diego: Academic Press. 1999. Vol. 2. P. 493–532. DOI: 10.1016/B978-012513905-2/50024-8.
2. Абызов А. М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дисперсного Al_2O_3 // Новые огнеупоры. 2019. № 1. С. 16–23.
3. Технология получения корундовой бронекерамики, модифицированной сложными добавками / П. М. Плетнев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326, № 3. С. 40–49.
4. Влияние содержания добавки в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--MnO}$ и температуры обжига на спекание композиционной керамики на основе электроплавленного корунда / А. Ч. Мое [и др.] // Новые огнеупоры. 2018. № 7. С. 20–23.
5. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable / S. Ghose [et al.] // Transactions of the Indian Ceramic Society. 2013. Vol. 72, no. 2. P. 113–118. DOI: 10.1080/0371750X.2013.794024.
6. Hsu Y. F., Wang S. F., Cheng T. W. Effects of additives on the densification and microstructural evolution of fine $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ powder // Materials Science and Engineering. 2003. Vol. 362. P. 300–308. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00614-2.
7. Влияние вида глинозема на свойства шликеров и образцов особо плотной корундовой керамики / В. В. Мартыненко [и др.] // Збірник наукових праць ПАТ «УкрНДІ вогнетривів ім А. С. Бережного». 2015. № 115. С. 46–55.
8. Кайнарский И. С., Дегтярева Э. В., Орлова И. Г. Корундовые огнеупоры и керамика. М.: Металлургия, 1981. 267 с.
9. Ultrafine wet grinding of corundum in the presence of triethanolamine / P. Bulejko [et al.] // Powder Technology. 2022. Vol. 395. P. 556–561. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.079.
10. Балкевич В. Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
11. Ramesh S., Siah L. F., Nor Azmah A. K. Sintering behaviour of slip-cast $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y-TZP}$ composites // Journal of Materials Science. 2000. Vol. 35. P. 5509–5515. DOI: 10.1023/A:1004837516291.
12. Die rheologischen Eigenschaften von wässrigen aluminiumoxid-suspensionen. Rheological properties of aqueous alumina suspensions / M. Majic Renjo // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2012. Vol. 43, no. 11. P. 979–983. DOI: 10.1002/mawe.201200844.
13. Tallon C., Limacher M., Franks G. V. Effect of particle size on the shaping of ceramics by slip casting // Journal of the European Ceramic Society. 2010. Vol. 30. P. 2819–2826. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.03.019.

14. Binner J. G. P., McDermott A. M. Rheological characterisation of ammonium polyacrylate dispersed, concentrated alumina suspensions // *Ceramics International*. 2006. Vol. 32. P. 803–810. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.06.004.
15. Karimian H., Babaluo A. A. Effect of polymeric binder and dispersant on the stability of colloidal alumina suspensions // *Iranian Polymer Journal*. 2006. Vol. 15. P. 879–889.
16. Rheophysical study of dispersed alumina suspensions / F. Boutenel [et al.] // *Powder Technology*. 2021. Vol. 393. P. 630–638. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.016.
17. Stabilization of highly concentrated alumina suspensions by different dispersants / I. Sever [et al.] // *Transactions of Famena*. 2018. Vol. 42, no. 3. P. 61–70. DOI: 10.21278/TOF.42304.
18. Effects of sintering additives on dispersion properties of Al_2O_3 slurry containing polyacrylic acid dispersant / H. Ohtsuka [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. P. 517–522. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.11.001.
19. Исследование реологических свойств глиноземистых шликеров, содержащих новые диспергирующую и упрочняющую добавки / В. В. Мартыненко [и др.] // *Збірник наукових праць ПАТ «УкрНДІ вогнетривів імя А. С. Бережного»*. 2016. № 116. С. 98–109.
20. Spataru M., Muntean M., Dumitrescu O. Stabilization of aqueous suspensions prepared from alumina and zircon powders. Volume: global roadmap for ceramics, ICC2 Proceedings. 2nd International congress on ceramics. Verona, Italy, 2008.
21. The role of organic dispersants in aqueous alumina suspensions / P. Tomasika [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 23. P. 913–919. DOI: 10.1016/S0955-2219(02)00204-2.
22. Chou K., Lee L. Effect of dispersants on the rheological properties and slip casting of concentrated alumina slurry // *Journal of the American Ceramic Society*. 1989. Vol. 72, no. 9. P. 1622–1627. DOI: 10.1111/J.1151-2916.1989.TB06293.X.
23. Seyerl J. V. Use of polycarboxylate ethers to improve workability of castables // *Materials Science*. 2007. Vol. 9. P. 46–49.
24. Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with Tpeg-type polyether kind polycarboxylate superplasticizers / Y. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 64. P. 324–332. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.050.
25. Исследование влияния технологических параметров на гранулометрические характеристики субмикронного оксида алюминия в α -форме / М. А. Трубицын [и др.] // *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. 2021. Т. 6, № 12. С. 84–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-84-97.
26. Piani I., Papo A. Sodium tripolyphosphate and polyphosphate as dispersing agents for alumina suspensions: rheological characterization // *Journal of Engineering*. 2013. Vol. 2013. P. 1–4. DOI: 10.1155/2013/930832.

References

1. Penn S., Alford N. Ceramic dielectrics for microwave applications. *Handbook of low and high dielectric constant materials and their applications*. San Diego: Academic Press, 1999, vol. 2, pp. 493–532. DOI: 10.1016/B978-012513905-2/50024-8.
2. Abyzov A. M. Aluminum oxide and aluminum oxide ceramics (Review). Part 1. Properties of Al_2O_3 and industrial production of dispersed Al_2O_3 . *Novyye ognepory* [New refractories], 2019, no. 1, pp. 16–23 (In Russian).
3. Pletnev P. M., Nepochatov Y. K., Malikova E. V., Bogayev A. A. Technology for obtaining corundum armor ceramics modified with complex additives. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2015, vol. 326, no. 3, pp. 40–49 (In Russian).
4. Aung Chzho Moye, Lukin E. S., Popova N. A., Provotorov D. A. The effect of the additive content in the Al_2O_3 – MgO – MnO system and the firing temperature on the sintering of composite ceramics based on electrofused corundum. *Novyye ognepory* [New refractories], 2018, no. 7, pp. 20–23 (In Russian).
5. Ghose S., Saigal C., Maldhure A., Das S. K. Effect of reactive alumina on the physico-mechanical properties of refractory castable. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 2013, vol. 72, no. 2, pp. 113–118. DOI: 10.1080/0371750X.2013.794024.
6. Hsu Y. F., Wang S. F., Cheng T. W. Effects of additives on the densification and microstructural evolution of fine θ - Al_2O_3 powder. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 362, pp. 300–308. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00614-2.
7. Martynenko V. V., Primachenko V. V., Krivoruchko P. P., Mishneva YU. E., Kushchenko K. I., Krakhmal' Y. A., Sinyukova E. I., Karyakina E. L. Influence of the type of alumina on the properties of slips and samples of particularly dense corundum ceramics. *Sbornik nauchnykh trudov PAO "UkrNII ogneporov"*

imenu A. S. Berezhnogo” [Collection of scientific papers of PJSC “UkrNII refractories named after A. S. Berezhny”], 2015, no. 115, pp. 46–55 (In Russian).

8. Kaynarskiy I. S., Degtyareva E. V., Orlova I. G. *Korundovyye ogneupory i keramika* [Corundum refractories and ceramics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 267 p. (In Russian).

9. Bulejko P., Sulekova N., Vlasak J., Tuunila R., Kinnarinen T., Sverak T. Ultrafine wet grinding of corundum in the presence of triethanolamine. *Powder Technology*, 2022, vol. 395, pp. 556–561. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.079.

10. Balkevich V. L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 256 p. (In Russian).

11. Ramesh S., Siah L. F., Nor Azmah A. K. Sintering behaviour of slip-cast Al_2O_3 -Y-TZP composites. *Journal of Materials Science*, 2000, vol. 35, pp. 5509–5515. DOI: 10.1023/A:1004837516291.

12. Majic Renjo M., Lalic M., Curkovic L., Matijasic G. Die rheologischen Eigenschaften von wässrigen Aluminiumoxid-suspensionen. Rheological properties of aqueous alumina suspensions. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2012, vol. 43, no. 11, pp. 979–983. DOI: 10.1002/mawe.201200844.

13. Tallon C., Limacher M., Franks G.V. Effect of particle size on the shaping of ceramics by slip casting. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, vol. 30, pp. 2819–2826. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2010.03.019.

14. Binner J. G. P., McDermott A. M. Rheological characterisation of ammonium polyacrylate dispersed, concentrated alumina suspensions. *Ceramics International*, 2006, vol. 32, pp. 803–810. DOI: 10.1016/j.ceramint.2005.06.004.

15. Karimian H., Babaluo A. A. Effect of polymeric binder and dispersant on the stability of colloidal alumina suspensions. *Iranian Polymer Journal*, 2006, vol. 15, pp. 879–889.

16. Boutenel F., Dusserre G., Aimableb A., Chartier T., Cutard T. Rheophysical study of dispersed alumina suspensions. *Powder Technology*, 2021, vol. 393, pp. 630–638. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.016.

17. Sever I., Zmak I., Curkovic L., Svageljstr Z. Stabilization of highly concentrated alumina suspensions by different dispersants. *Transactions of Famena*, 2018, vol. 42 no. 3, pp. 61–70. DOI: 10.21278/TOF.42304.

18. Ohtsuka H., Mizutani H., Satoshi I., Asai K., Kiguchi T., Satone H., Mori T., Tsubaki J. Effects of sintering additives on dispersion properties of Al_2O_3 slurry containing polyacrylic acid dispersant. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, vol. 31, pp. 517–522. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2010.11.001.

19. Martynenko V. V., Primachenko V. V., Mishneva Y. E., Kushchenko K. I., Krakhmal’ Y. A., Karyakina E. L. Study of rheological properties of alumina slips containing new dispersing and strengthening additives. *Sbornik nauchnykh trudov PAO “UkrNII ogneuporov imeni A. S. Berezhnogo”* [Collection of scientific papers of PJSC “UkrNII refractories named after A. S. Berezhny”], 2016, no. 116, pp. 98–109 (In Russian).

20. Spataru M., Muntean M., Dumitrescu O. Stabilization of aqueous suspensions prepared from alumina and zircon powders. Volume: global roadmap for ceramics, ICC2 Proceedings. *2nd International congress on ceramics*. Verona, Italy, 2008.

21. Tomasika P., Schillingb C. H., Jankowiack R., Kim J. The role of organic dispersants in aqueous alumina suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, vol. 23, pp. 913–919. DOI: 10.1016/S0955-2219(02)00204-2.

22. Chou K., Lee L. Effect of dispersants on the rheological properties and slip casting of concentrated alumina slurry. *Journal of the American Ceramic Society*, 1989, vol. 72, no. 9, pp. 1622–1627. DOI: 10.1111/J.1151-2916.1989.TB06293.X

23. Seyerl J. V. Use of polycarboxylate ethers to improve workability of castables. *Materials Science*, 2007, vol. 9, pp. 46–49.

24. Li Y., Yang C., Zhang Y., Zheng J., Guo H., Lu M. Study on dispersion, adsorption and flow retaining behaviors of cement mortars with Tpeg-type polyether kind polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 64, pp. 324–332. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.050.

25. Trubitsyn M. A., Volovichcheva N. A., Furda L. V., Skrypnikov N. S. Study of the effect of technological parameters on the granulometric characteristics of submicron aluminum oxide in α -form. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov], 2021, vol. 6, no. 12, pp. 84–97. DOI: 0.34031/2071-7318-2021-6-12-84-97 (In Russian).

26. Piani I., Papo A. Sodium tripolyphosphate and polyphosphate as dispersing agents for alumina suspensions: rheological characterization. *Journal of Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1155/2013/930832.

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. Белгородский государственный национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Российская Федерация). E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru.

Фурда Любовь Владимировна – кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. Белгородский государственный национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Российская Федерация). E-mail: furda@bsu.edu.ru.

Воловичева Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. Белгородский государственный национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Российская Федерация). E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru.

Лисняк Виктория Владимировна – аспирант, техник кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии. Белгородский государственный национальный исследовательский университет (308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Российская Федерация). E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru.

Information about the authors

Trubitsyn Mikhail Aleksandrovich – PhD (Engineering), Professor, the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. Belgorod National Research University (85, Pobedy str., 308015, Belgorod, Russian Federation). E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru

Furda Lyubov' Vladimirovna – PhD (Chemistry), Assistant Professor, the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. Belgorod National Research University (85, Pobedy str., 308015, Belgorod, Russian Federation). E-mail: furda@bsu.edu.ru

Volovicheva Natal'ya Aleksandrovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. Belgorod National Research University (85, Pobedy str., 308015, Belgorod, Russian Federation). E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru

Lisnyak Viktoriya Vladimirovna – PhD student, technician, the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology. Belgorod National Research University (85, Pobedy str., 308015, Belgorod, Russian Federation). E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru

Поступила 14.06.2022