

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26

**Фролова М.А.**

Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова

E-mail: aizenmaria@gmail.com

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ МИНЕРАЛЬНЫХ КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ

**Аннотация.** На примере высокодисперсных порошков кварцевого песка, характеризующегося содержанием  $\text{SiO}_2$  – 98,3 % оработаны методические приемы пробоподготовки опытных образцов для последующего определения удельной поверхностной энергии методом Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле (ОВРК). С этой целью сырьевой материал был диспергирован сухим помолом на планетарной шаровой мельнице, время механической активации изменялось в диапазоне 15÷45 мин. Было получено пять фракций высокодисперсных порошков, которые охарактеризованы по величине удельной поверхности. Данный параметр изменялся в следующем диапазоне: 1200÷3000  $\text{кг}/\text{м}^2$ . Опытные образцы для последующего исследования методом ОВРК были изготовлены путем прессования при величине усилия прессования от 2 до 16 тонн. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости косинуса угла смачивания поверхности опытных образцов рабочими жидкостями (декан, глицерин, вода) от дисперсионной составляющей их поверхностного натяжения.

Установлено, что для используемого кварцевого песка максимальное значение коэффициента детерминации (0,94) отмечается при усилии прессования высокодисперсных фракций, равного двум тоннам. Увеличение удельной поверхности порошковых материалов более 2370  $\text{кг}/\text{м}^2$ , полученных методом механического диспергирования и увеличении усилия прессования до 12÷16 т, приводит к дополнительным погрешностям определения поверхностного натяжения уплотненных опытных образцов методом ОВРК.

**Ключевые слова:** высокодисперсные порошки кварцевого песка, удельная поверхностная энергия, метод ОВРК, коэффициент детерминации, усилие прессования.

**Введение.** Управление структурообразованием и, в конечном итоге, свойствами бетонной смеси или готового бетона основано на использовании химических и минеральных добавок. Минеральные добавки (порошки минеральных пород) природного (горные породы) и техногенного (молотые шлаки, зола и т. д.) происхождения выполняют функции заполнителя, наполнителя, уплотнителя, модификатора [1–5]. В связи с такой полифункциональностью важным критерием при оценке возможностей использования минерального порошка (например, как заполнителя – уплотняющего структуру бетона, или наполнителя – уменьшающего расход цемента) является характеристика его активности [6–8], проявляющаяся в свободной поверхностной энергии рассматриваемых дисперсных системах [9–12]. Другим критерием склонности дисперсной системы к возможной самопроизвольной агрегации частиц за счет ван-дер-ваальсового взаимодействия, является величина постоянной Гамакера [11, 13]. Поэтому понятен проявляемый интерес исследователей к вопросам, связанным с количественным определением данных параметров. В этом плане в последнее время получили широкое распространение методы, осно-

ванные на измерении угла смачивания поверхности рабочими жидкостями (А. Зисмана, ОВРК [11, 12, 14–17]), образованной анализируемыми системами, причем в случае исследования минеральных порошков пробоподготовка включает в себя процесс уплотнения дисперсной системы под избыточной нагрузкой [18]. Кроме того, можно отметить, что измерение краевых углов смачивания позволяет подойти к решению вопросов, связанных с оценкой структурообразующей способности по потенциалу притяжения Ван-Дер-Ваальса и совместимости компонентов смеси с учетом постоянной Гамакера, рассчитываемой по уравнению Дерягина [19–21].

В работах [13, 16, 18, 21] представлены важные результаты методических подходов при расчете энергетических параметров поверхности порошков (удельной величины поверхностной энергии, численно равной поверхностному натяжению) с использованием метода Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле при использовании в качестве рабочих жидкостей декана, глицерина и воды, однако учитывая зависимость краевого угла смачивания от шероховатости поверхности (уравнение Венцеля–Дерягина [12]), в настоящее время остается неопределенным фактор выбора

величины избыточного усилия прессования исходного порошка в процессе пробоподготовки (данный параметр для большинства работ составляет от 2 до 16 тонн).

Поэтому целью данной работы является оптимизация условий изготовления опытных образцов порошковых систем по усилию прессования при реализации метода ОВРК. В этом случае в качестве критерия оптимизации может служить коэффициент детерминации ( $R^2$ ) линейной зависимости между  $\cos\theta$  и обратной величиной поверхностного натяжения рабочих жидкостей ( $1/\sigma_{ж}$ ), которая следует из уравнения Дерягина:

$$\cos\theta - 1 = \frac{A_{01}}{12\pi h} \cdot \frac{1}{\sigma_{ж}}, \quad (1)$$

где  $A_{01}$  – постоянная Гамакера на границе твердое тело-раствор («0» и «1» – обозначение жидкой и твердой фаз, соответственно);  $h$  – ван-дер-ваальсовое расстояние, 0,24 нм.

Однако, надо учитывать тот факт, что  $A_{01}$  в данном случае (при реализации метода ОВРК) не является строгой термодинамической величиной, так как смачивание поверхности опытных образцов происходит различными по природе жидкостями и по этой причине рассчитать непосредственно аналоговую величину постоянной Гамакера по алгоритму, приведенному в [21] не представляется возможным. Кроме того, для построения зависимости (1) вместо поверхностного натяжения жидкости необходимо использовать соответствующую величину ее дисперсионной составляющей ( $\sigma_s^d$ ).

**Материалы и методы.** В качестве пилотного объекта исследования был выбран кварцевый песок, который использован авторами при проведении экспериментов в работе [23]. Химический состав исходных образцов определен по

результатам рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного с помощью анализатора ПРФА «МетЭксперт». Образцы механически активировали до получения разной величины площади удельной поверхности путем сухого измельчения в планетарно-шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин. Исходный кварцевый песок диспергировали в течение 15, 25, 30 и 45 минут. Удельная поверхность тонкодисперсных порошков измерена на анализаторе Autosorb-iQ-MP. Для исследований из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 изготовлены образцы-запрессовки диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 минут фиксированного избыточного усилия ( $p$ ) 2, 4, 8, 12 и 16 тонн. Экспериментальные значения краевого угла смачивания ( $\theta$ ) поверхностей образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными дисперсионными составляющими ( $\sigma_s^d$ ) поверхностного натяжения (вода, глицерин, декан) были определены с помощью гониометра DSA-20E (EasyDrop). Для нахождения функциональной взаимосвязи между значениями  $(\cos\theta-1)$  и  $1/\sigma_s^d$  использовали следующие значения дисперсионной составляющей поверхностного натяжения рабочих жидкостей [24, 25]: вода – 23,8 мН/м; глицерин – 37,0 мН/м; декан – 21,8 мН/м.

**Основная часть.** Минеральный состав показал, что исследуемый образец кварцевого песка содержит (в пересчете на оксиды) 98,3%  $\text{SiO}_2$ , в качестве примесей были обнаружены оксиды железа и титана. В таблице 1 представлены значения удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) порошков кварцевого песка, полученных при разном времени механического помола ( $t$ ).

Таблица 1

**Значение удельной поверхности порошков кварцевого песка при разном времени механического помола**

$t$ , мин	0	15	25	30	45
$S_{уд}$ , кг/м <sup>2</sup>	1200	2370	2690	3000	1570

Зависимости  $S_{уд}=f(t)$  имеют экстремум при времени помола порядка 30 мин, этот факт позволяет сделать вывод, что это время механической активации является оптимальным для исследуемого образца кварцевого песка. При продолжительности помола более 30 мин происходит снижение величины удельной поверхности, что на наш взгляд объясняется наличием значительного избытка свободной поверхностной энергии дисперсной системы и стремлением самопроизвольно уменьшить этот параметр за счет агрегации твердых частиц порошков при увеличении времени механической активации.

В таблице 2 приведены экспериментальные результаты по определению угла смачивания поверхности образцов и рассчитанные значения косинуса этого параметра (приведены средние значения угла по трем параллельным измерениям). Установлено, что для используемого порошка кварцевого песка при использовании органических рабочих жидкостей (декан, глицерин) с увеличением давления прессования угол смачивания уменьшается. Обратный эффект наблюдается в случае применения в качестве рабочей жидкости воды. В этом варианте для всех серий экспериментов наблюдается увеличение угла смачивания, при этом изменение значений  $\cos\theta$

(рис.1) имеет линейный характер (в отличие от декана и глицерина).

На рисунках 2–4 представлены функциональные зависимости  $\cos\theta=f(S_{уд})$  для используемых рабочих жидкостей для уплотненных дисперсных образцов, полученных при различном усилии уплотнения. Приведенные данные показывают, что в случае использования декана в качестве смачивающей жидкости значения  $\cos\theta$

практически не зависят от удельной поверхности для образцов, полученных при разном усилии уплотнения. Для глицерина и воды наблюдается область независимости косинуса угла смачивания от удельной поверхности для исследуемого образца кварцевого песка. Можно заключить, что критическое значение удельной поверхности порошков при любом режиме прессования в этом случае составляет  $2370 \text{ кг/м}^2$ .

Таблица 2

### Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок кварцевого песка

Время помола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{ср} \pm 0,1, ^\circ$			$\cos\theta_{ср}$		
		декан	глицерин	вода	декан	глицерин	вода
0	2	12,0	20,5	19,1	0,978	0,937	0,945
	4	12,0	20,1	19,4	0,978	0,939	0,943
	8	11,9	19,6	19,9	0,979	0,942	0,940
	12	11,9	18,7	20,7	0,979	0,947	0,935
	16	10,6	18,4	21,3	0,983	0,949	0,932
15	2	11,7	20,4	19,0	0,979	0,937	0,946
	4	11,7	20,0	19,2	0,979	0,940	0,944
	8	11,5	19,5	19,8	0,980	0,943	0,941
	12	11,3	18,6	20,6	0,981	0,948	0,936
	16	10,3	18,3	21,2	0,984	0,949	0,932
25	2	11,6	16,1	15,4	0,980	0,961	0,964
	4	11,5	16,3	21,6	0,980	0,960	0,930
	8	11,4	16,2	23,8	0,980	0,960	0,915
	12	11,1	16,0	28,2	0,981	0,961	0,881
	16	10,1	15,9	29,7	0,985	0,962	0,869
30	2	9,8	12,0	12,8	0,985	0,978	0,975
	4	9,7	13,0	21,7	0,986	0,974	0,929
	8	8,9	12,4	30,5	0,988	0,977	0,862
	12	7,8	11,8	35,9	0,991	0,979	0,810
	16	7,3	11,2	38,0	0,992	0,981	0,788
45	2	14,4	17,9	16,0	0,969	0,952	0,961
	4	12,2	14,2	17,3	0,977	0,969	0,955
	8	9,9	12,8	18,8	0,985	0,975	0,947
	12	7,9	11,8	19,2	0,991	0,979	0,944
	16	7,3	11,5	22,0	0,992	0,980	0,927

Таким образом, области для которых отсутствует влияние удельной поверхности (размерных характеристик частиц, шероховатости поверхности и пр.) запрессованных образцов порошков кварцевого песка позволяют определить возможные оптимальные условия подготовки опытных образцов для реализации метода ОВРК. Так для воды и глицерина усилии прессования 2 тонны, при этом удельная поверхность должна иметь значения порядка  $2370 \text{ кг/м}^2$ . Для декана можно использовать эти значения в более широ-

ком диапазоне, но для унификации пробоподготовки используем аналогичные значения усилии прессования и удельной поверхности. На рисунке 5 представлена функциональная зависимость  $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$ , которая имеет линейный характер, с коэффициентом детерминации (доверности аппроксимации)  $R^2=0,94$ . Кроме того, для сравнительного анализа представлены аналогичные зависимости для других условий пробоподготовки, которые имеют значительно более низкое значение показателя  $R^2$ .

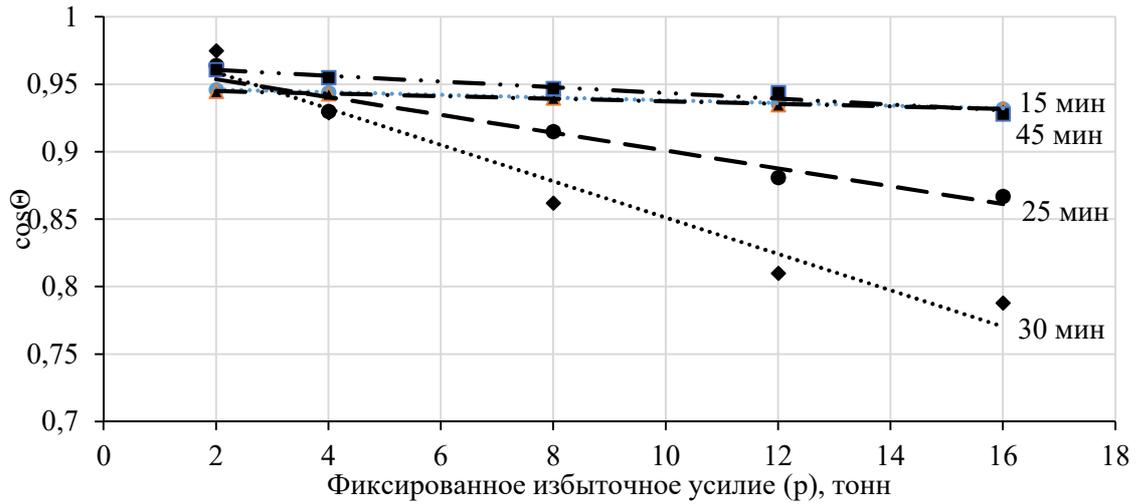


Рис. 1. Функциональная зависимость  $\cos\theta=f(p)$  для воды при различном времени механического помола

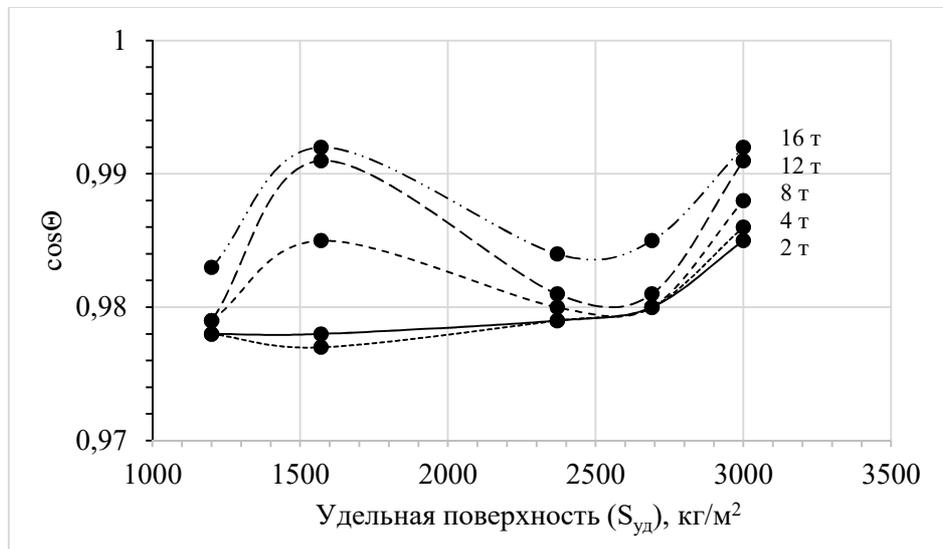


Рис. 2. Функциональная зависимость  $\cos\theta=f(S_{уд})$  для образцов, обработанных деканом при различном усилии прессования

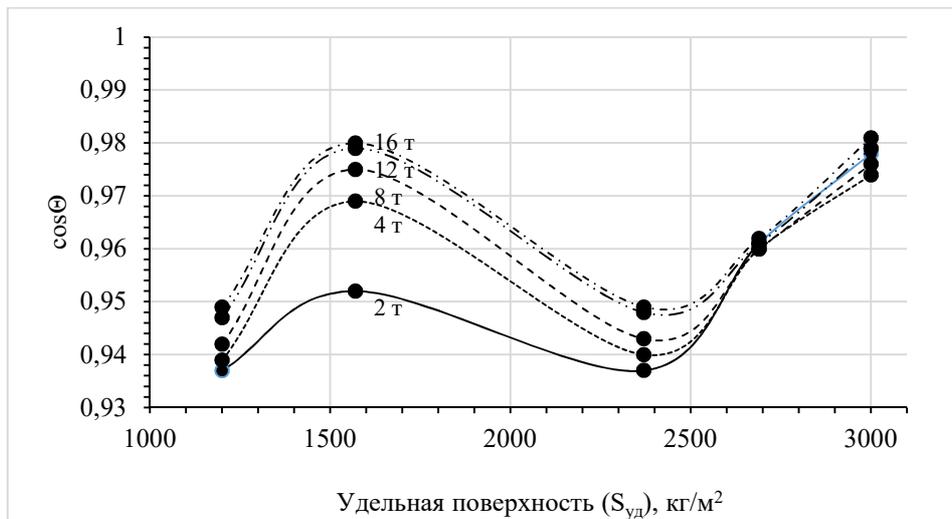


Рис. 3. Функциональная зависимость  $\cos\theta=f(S_{уд})$  для образцов, обработанных глицерином при различном усилии прессования

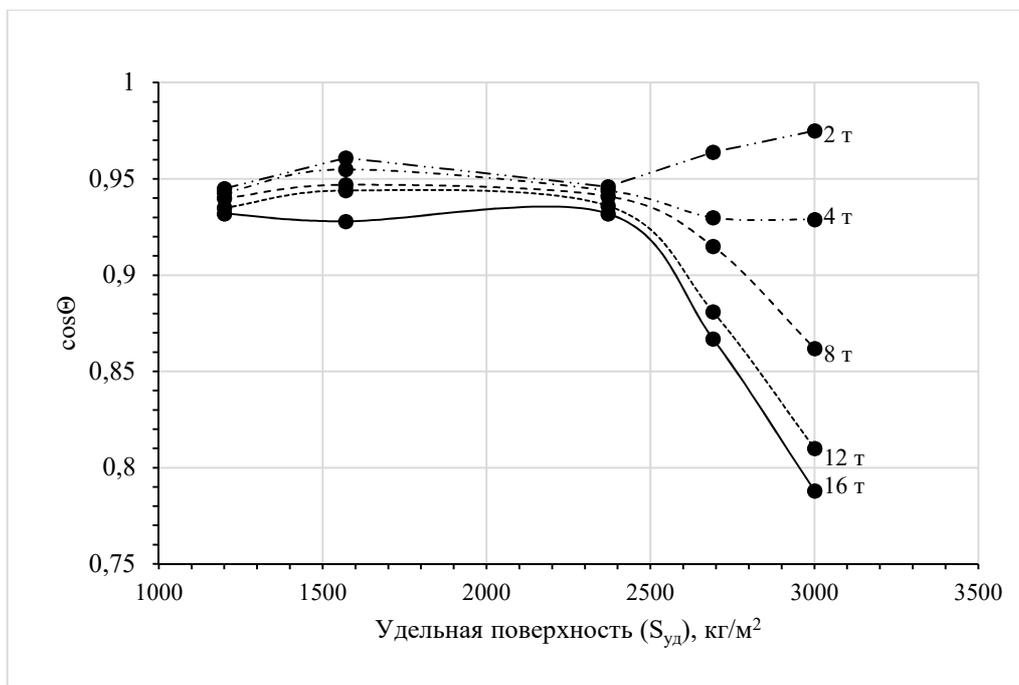


Рис. 4. Функциональная зависимость  $\cos\theta=f(S_{уд})$  для образцов, обработанных водой при различном усилии прессования

Таким образом, при реализации метода определения поверхностного натяжения (удельной свободной поверхностной энергии) минеральных порошков на основе кварцсодержащих горных пород методом Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле необходимо учитывать не только смачиваемость поверхности опытных образцов рабочими жидкостями, но и ее шероховатость, препятствующую растеканию капли жидкости на границе раздела фаз. Данный эффект наиболее заметно проявляется для водной среды, для декана влияние неоднородности поверхности опытных образцов практически не проявляется.

Для процесса пробоподготовки опытных образцов из порошков разной степени дисперсности необходимо в результате предварительных исследований установить зависимость косинуса угла смачивания от величины удельной поверхности исходного материала, которая должна быть использована при определении диапазона усилий прессования, для которого данная зависимость практически отсутствует или проявляется слабо. Так, например, для используемого кварцевого песка этот факт отмечается при усилии прессования, равного двум тоннам. Следует отметить, что увеличение удельной поверхности порошковых материалов методом механического диспергирования более 2370 кг/м<sup>2</sup> и увеличение усилия прессования до 12÷16 т, приводит к дополнительным погрешностям определения поверхностного натяжения уплотненных опытных образцов методом ОВРК. Данный эффект может быть связан с дополнительным неконтро-

лируемым разрушением кристаллической структуры частиц анализируемого материала и, как следствие, увеличением неоднородности поверхности. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости  $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$ .

Вместе с тем, отмечено, что при механическом размоле сырьевого материала минеральных кварцсодержащих горных пород значительное увеличение времени диспергирования может приводить к уменьшению значений удельной поверхности, связанное с самопроизвольной агрегацией частиц. Так, для исследуемого порошка кварцевого песка данный эффект проявляется при увеличении времени помола более 30 мин.

#### Выводы

Таким образом, на основании вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при реализации метода определения поверхностного натяжения (удельной свободной поверхностной энергии) минеральных порошков на основе кварцсодержащих горных пород методом ОВРК необходимо учитывать не только смачиваемость поверхности опытных образцов рабочими жидкостями, но и ее шероховатость, препятствующую растеканию капли жидкости на границе раздела фаз.

2. В качестве критерия оптимизации условий пробоподготовки предложен коэффициент детерминации функциональной зависимости косинуса угла смачивания поверхности опытных

образцов рабочими жидкостями (декан, глицерин, вода) от дисперсионной составляющей их поверхностного натяжения,  $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$ .

3. Установлено, что для кварцевого песка

максимальное значение коэффициента детерминации (0,94) отмечается при усилении прессования высокодисперсных фракций, равного двум тоннам.

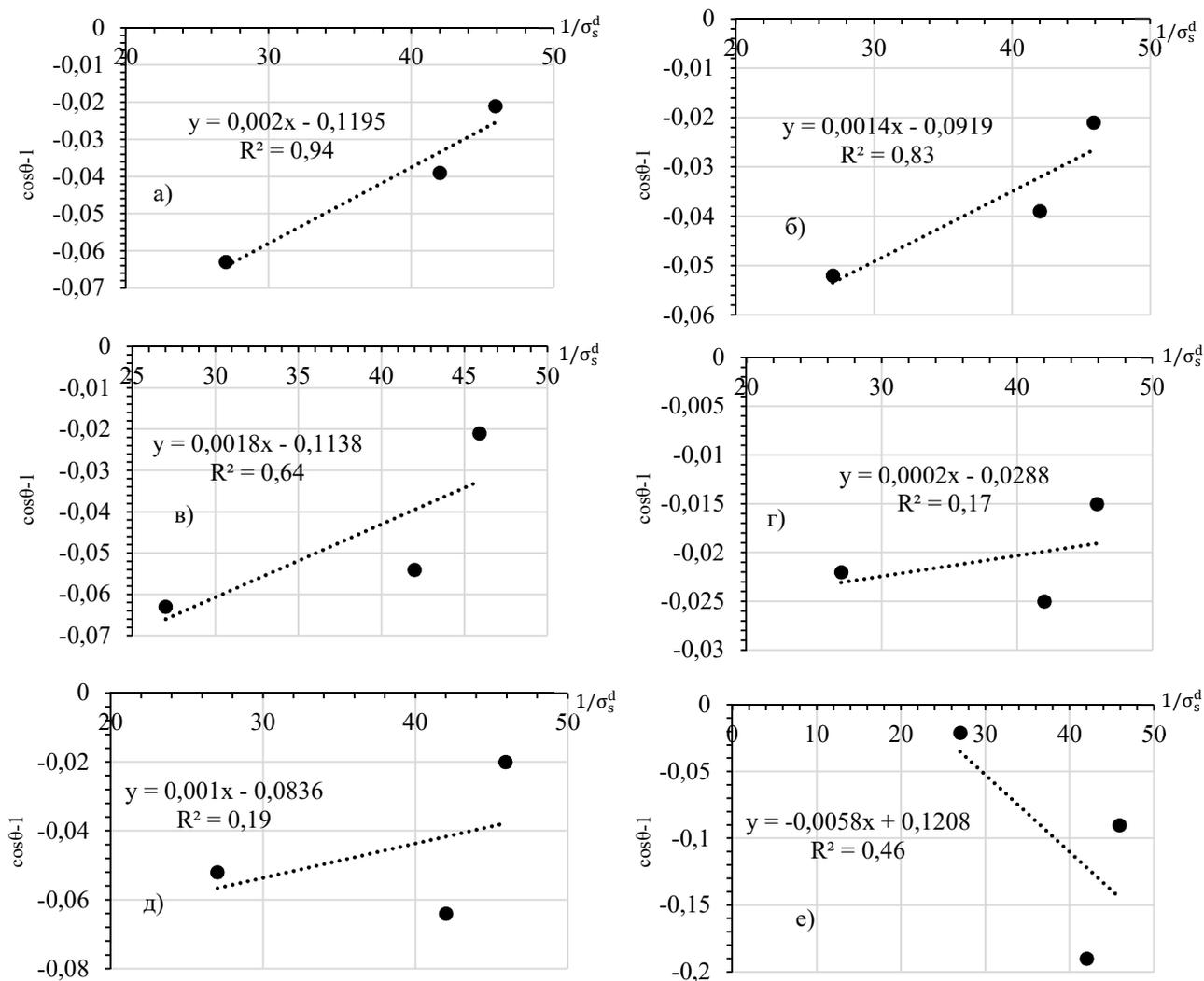


Рис. 5. Функциональная зависимость  $\cos\theta-1=f(1/\sigma_s^d)$ :

- а)  $p = 2$  т (вода, глицерин, декан),  $2370 \text{ кг/м}^2$ ; б)  $p = 2$  т (вода, декан),  $p = 12$  т (глицерин),  $2370 \text{ кг/м}^2$ ;  
 в)  $p = 2$  т (вода),  $2690 \text{ кг/м}^2$ , глицерин, декан ( $2370 \text{ кг/м}^2$ );  
 г)  $p = 2$  т (вода, глицерин, декан),  $3000 \text{ кг/м}^2$ ;  $p = 12$  т (вода, глицерин, декан),  $2370 \text{ кг/м}^2$ ;  
 е)  $p = 12$  т (вода, глицерин, декан),  $3000 \text{ кг/м}^2$

**Источник финансирования.** Исследования проводились на уникальном научном оборудовании «Физическая химия поверхностей нанодисперсных систем» при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-23-00047.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса

модификаторов // Строительные материалы. 2021. №12. С. 48–54.

2. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитин О.В. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1(46). С. 20–27.

3. Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М. Композиционные материалы как полидисперсные Системы. Эффективные модели // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3. С.16–25.

4. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6–10.
5. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
6. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М. А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68–72.
7. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутьгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45–48.
8. Морозова М.В. Активность поверхности высокодисперсных систем на основе сапонит-содержащего отхода алмазодобывающей промышленности // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 2. С. 5–11.
9. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Определение удельной свободной поверхностной энергии бесклинкерных композитов на вяжущем щелочной активации // Строительные материалы. 2022. № 1–2. С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>.
10. Danilov V. E., Ayzenshtadt A.M., Frolova M. A., Tutygin A.S. Dispersion Interactions as Criterion of Optimization of Cementless Composite Binders // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 4. Pp. 767–771.
11. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтовых веществ методом Оуэнса-Вендта-Рабеля-Каелбле // Свиридовские чтения, Минск. 2012. Вып.8. С. 253–260.
12. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник. СПб.: Издательство «Лань». 2015. 672 с.
13. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the Contact Angles of Powders by the Sessile Drop Method // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798.
14. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В. Связь энергетических характеристик поверхности стеклопластика марки ВПС-53К с прочностью клевого соединения на его основе // Труды ВИАМ. 2020. №10(92). С. 40–50.
15. Фролова М.А., Тутьгин А.С., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Махова Т.А., Поспелова Т.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. № 2 (4). С. 120–125.
16. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М. Оценка дисперсионного взаимодействия в алюмосиликатной системе под действием органической добавки // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 4. С. 83–88.
17. Susana L., Campaci F., Santomaso A.C. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique // Powder Technology. 2012. Vol. 226. Pp. 68–77.
18. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Aizenshtadt A. M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199.
19. Дерягин Б.Д., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Изд-во «Наука». 1984. 160 с.
20. Русанов А.И. К термодинамике тонких пленок. Уравнение Фрумкина-Дерягина // Коллоидный журнал. 2020. Том 82. № 1. С. 75–81.
21. Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Дроздук Т.А., Данилов В.Е., Фролова М.А. Возможный подход к оценке дисперсионного взаимодействия в порошковых системах // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 3. С. 40–48.
22. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Чибисов А.А. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 27–36.
23. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. Том 6. №5. С. 19–27.
24. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Къельбле // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66–72.
25. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding // Polymer Composites. 2017. Vol. 38. Iss. 3. Pp. 507–515.

Информация об авторах

**Фролова Мария Аркадьевна**, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 163002, Архангельская область, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

Поступила 15.04.2022 г.

© Фролова М.А., 2022

**Frolova M.A.**

*Northern Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov*

*E-mail: aizenmaria@gmail.com*

## METHODOLOGICAL FEATURES OF DETERMINATION THE SPECIFIC SURFACE ENERGY OF MINERAL QUARTZ-CONTAINING POWDERS

**Abstract.** Methods for sample preparation of prototypes for the subsequent determination of the specific surface energy by the Owens, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK) method are worked out on the example of highly dispersed powders of quartz sand, characterized by a SiO<sub>2</sub> content of 98.3 %. For this purpose, dry grinding in a planetary ball mill disperses the raw material, the mechanical activation time is varied in the range of 15÷45 min. Five fractions of highly dispersed powders are obtained. They are characterized by the specific surface area. This parameter is changed in the following range: 1200÷3000 kg/m<sup>2</sup>. Prototypes for subsequent research by the OWRK method are made by pressing with a pressing force of 2 to 16 tons. As a criterion for optimizing sample preparation conditions, the coefficient of determination of the functional dependence of the cosine of the wetting angle of the surface of test samples with working fluids (decane, glycerin, water) on the dispersion component of their surface tension is proposed. It has been established that for the quartz sand used, the maximum value of the coefficient of determination (0.94) is noted at a pressing force of fine fractions equal to two tons. An increase in the specific surface area of powder materials over 2370 kg/m<sup>2</sup>, obtained by mechanical dispersion and an increase in pressing force up to 12÷16 tons, leads to additional errors in determining the surface tension of compacted prototypes by the OWRK method.

**Keywords:** highly dispersed powders of quartz sand, specific surface energy, OWRK method, coefficient of determination, pressing force.

### REFERENCES

1. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers [Sostav i svoystva samouplotnyayushchegosya betona s ispol'zovaniem kompleksa modifikatorov]. Building materials. 2021. No. 12. Pp. 48–54. (rus)
2. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salnikova A.S., Kazlitin O.V. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concrete [K voprosu povysheniya effektivnosti vysokoprochnyh samouplotnyayushchihsya betonov]. Regional architecture and construction. 2021. No. 1(46). Pp. 20–27. (rus)
3. Korolev E. V., Grishina A. N., Aizenshtadt A. M. Composite materials as polydisperse systems. Effective models [Kompozicionnye materialy kak polidispersnye Sistemy. Effektivnye modeli]. Regional architecture and construction. 2021. No. 3. Pp. 16–25. (rus)
4. Kapriyelov S.S., Batrakov V.G., Sheinfeld A.V. Modified concrete of a new generation: reality and perspective [Modificirovannye betony novogo pokoleniya: real'nost' i perspektiva]. Beton and reinforced concrete. 1999. No. 6. Pp. 6–10. (rus)
5. Alos Dushimimana A., Niyonsenga A.A., Nzamurambaho F. A review on strength development of high performance concrete. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
6. Veshnyakova L.A., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A. Evaluation of the surface activity of highly dispersed raw materials for composite building materials [Ocenka poverhnostnoj aktivnosti vysokodispersnogo syr'ya dlya kompozicionnyh stroitel'nyh materialov]. Physics and Chemistry of Materials Processing. 2015. No. 2. Pp. 68–72. (rus)
7. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Aizenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of silicon-containing rocks [Poverhnostnaya aktivnost' kremnesoderzhashchih gornyh porod]. Materialovedenie. 2016. No. 5. Pp. 45–48. (rus)
8. Morozova M.V. Activity of the surface of highly dispersed systems based on saponite-containing waste of the diamond mining industry [Aktivnost' poverhnosti vysokodispersnyh sistem na osnove saponit-soderzhashchego othoda almazodobyvayushchej promyshlennosti]. Vestnik BSTU named after V. G. Shukhov. 2018. No. 2. Pp. 5–11. (rus)

9. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Determination of the specific free surface energy of clinker-free composites on an alkaline activation binder [Opredelenie udel'noj svobodnoj poverhnostnoj energii besklinskerykh kompozitov na vyazhushchem shchelochnoj aktivacii]. *Stroitel'nye materialy*. 2022. No. 1–2. Pp. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-30-39>. (rus)
10. Danilov V. E., Ayzenshtadt A.M., Frolova M. A., Tutygin A.S. Dispersion Interactions as Criterion of Optimization of Cementless Composite Binders. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. No. 4. pp. 767–771.
11. Yakovets N.V., Krutko N.P., Opanasenko O.N. Determination of the free surface energy of powdered resinous-asphaltene substances by the Owens-Wendt-Rabel-Kaelble method [Opredelenie svobodnoj poverhnostnoj energii poroshkoobraznykh smolisto-asfal'tenovykh veshchestv metodom Ouensa-Vendta-Rabelya-Kaelble]. *Sviridovskie readings*, Minsk. 2012. Issue 8. Pp. 253–260. (rus)
12. Volkov V. A. Colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems [Kolloidnaya himiya. Poverhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy]: Textbook. - 2nd ed. St. Petersburg: Publishing house "Lan". 2015. 672 p. (rus)
13. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M. Measuring the Contact Angles of Powders by the Sessile Drop Method. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 794–798.
14. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Starostina I.V. Connection of the energy characteristics of the surface of fiberglass grade VPS-53K with the strength of the adhesive joint based on it [Svyaz' energeticheskikh karakteristik poverhnosti stekloplastika marki VPS-53K s prochnost'yu kleevogo soedineniya na ego osnove]. *Proceedings of VIAM*. 2020. No. 10(92). Pp. 40–50. (rus)
15. Frolova M.A., Tutygin A.S., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Makhova T.A., Pospelova T.A. Criteria for evaluating the energy properties of the surface [Kriterij ocenki energeticheskikh svojstv poverhnosti]. *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2011. No. 2 (4). Pp. 120–125. (rus)
16. Sokolova Yu.V., Ayzenshtadt A.M. Evaluation of dispersion interaction in an aluminosilicate system under the action of an organic additive [Ocenka dispersionnogo vzaimodejstviya v al'yumosilikatnoj sisteme pod dejstviem organicheskoy dobavki]. *Physics and Chemistry of Materials Processing*. 2017. No. 4. Pp. 83–88. (rus)
17. Susana L., Campaci F., Santomaso A.C. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique. *Powder Technology*. 2012. Vol. 226. Pp. 68–77.
18. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Aizenshtadt A. M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199.
19. Deryagin B.D., Churaev N.V. Wetting films [Smachivayushchie plenki]. M.: Publishing house "Nauka", 1984. 160 p. (rus)
20. Rusanov A.I. On the thermodynamics of thin films. Frumkin-Deryagin equation [K termodinamike tonkih plenok. Uravnenie Frumkina-Deryagina] *Colloid journal*. 2020. Vol. 82. No. 1. Pp. 75–81. (rus)
21. Aizenstadt A.M., Korolev E.V., Drozdjuk T.A., Danilov V.E., Frolova M.A. A possible approach to the evaluation of dispersion interaction in powder systems [Vozmozhnyj podhod k ocenke dispersionnogo vzaimodejstviya v poroshkovykh sistemah]. *Physics and Chemistry of Materials Processing*. 2021. No. 3. Pp. 40–48. (rus)
22. Sokolova Yu.V., Aizenshtadt A.M., Korolev E.V., Chibisov A.A. Evaluation of the influence of prescription factors on the structure formation of a polymer-organic binder [Ocenka vliyaniya recepturnykh faktorov na strukturoobrazovanie polimer-organicheskogo svyazuyushchego]. *Stroitel'nye materialy*. 2020. No. 9. Pp. 27–36. (rus)
23. Shamanina A.V., Aizenstadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Evaluation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks [Ocenka effektivnosti mekhanoaktivacii kremnezemsoderzhashchih gornykh porod]. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. Vol. 6. No. 5. Pp. 19–27. (rus)
24. Danilov V.E., Korolev E.V., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Peculiarities of calculation of surface free energy based on the Ouns–Wendt–Rabel–Kjellble interfacial interaction model [Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa–Vendta–Rabelya–K'el'ble]. *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 11. Pp. 66–72. (rus)
25. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. Iss. 3. Pp. 507–515.

*Information about the authors*

**Frolova, Maria A.** PhD. E-mail: [aizenmaria@gmail.com](mailto:aizenmaria@gmail.com), Northern Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov, Russia, 163002, Arkhangelsk, st. Northern Dvina river emb., 17

*Received 15.04.2022*

**Для цитирования:**

Фролова М.А. Методические особенности определения удельной поверхностной энергии минеральных кварцсодержащих порошков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26

**For citation:**

Frolova M.A. Methodological features of determination the specific surface energy of mineral quartz-containing powders. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-17-26