

ФИЗИКА PHYSICS

УДК 538.9

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.47928/1726-9946-2022-22-4-57-66>

О методических особенностях и ошибках измерения поверхностного натяжения водных суспензий

Р. Х. Дадашев¹, Р. С. Джамбулатов²*Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН,
Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова, Грозный, Россия*¹*raykom50@mail.ru*, ²*asldzam@mail.ru*

Аннотация. В работе дается анализ методических особенностей измерения поверхностного натяжения высокодисперсных систем, к которым относятся и суспензии бентонитов. Показано, что суспензии бентонитов являются сложными неравновесными системами, при измерении поверхностного натяжения которых необходимо учесть влияние на ее величину многих факторов, основными из которых являются диспергирование и седиментация. Указанные факторы оказывают существенное влияние на измеряемое значение поверхностного натяжения. Неравновесность исследуемой системы приводит к временной зависимости поверхностного натяжения, что существенно осложняет измерение его зависимости от температуры. Для измерения поверхностного натяжения суспензии бентонитов разработан и апробирован новый метод, который базируется на суперпозиции результатов измерения, полученных двумя независимыми методами – методами висящей и лежащей капли. Седиментация, при использовании этих методов, приводит к противоположно направленным (относительно поверхности) процессам: в первом случае поверхность капли обогащается частицами твердой фазы, во втором – обедняется. Экспериментальные исследований временных зависимостей поверхностного натяжения показали, что в методе висящей капли наблюдается линейное уменьшение поверхностного натяжения, в методе лежащей капли поверхностного натяжения линейно возрастает со временем. Суперпозиция результатов, полученных этими методами, позволяет найти значение поверхностного натяжения в данный момент времени. Проведен анализ влияния различных факторов на погрешность измерения поверхностного натяжения разработанным методом.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, дисперсная фаза, дисперсионная среда, суспензия бентонита, методы измерения, лежащая капля, висящая капля, седиментация, случайная и систематическая ошибка измерения

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за указанные замечания, которые позволили повысить качество статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. *Дадашев Р. Х., Джамбулатов Р. С. О методических особенностях и ошибках измерения поверхностного натяжения водных суспензий // Доклады АМАН. 2022. Т. 22, № 4. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.47928/1726-9946-2022-22-4-57-66>*

© Дадашев Р. Х.,
Джамбулатов Р. С., 2022



On the methodological features and errors of measuring the surface tension of aqueous suspensions

Raykom H. Dadashev¹, Roman S. Dzhambulatov²

Kh. I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

Chechen State University A. A. Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

¹*raykom50@mail.ru*, ²*asldzam@mail.ru*

Abstract. The paper analyzes the methodological features of measuring the surface tension of highly dispersed systems, which include bentonite suspensions. It is shown that bentonite suspensions are complex nonequilibrium systems, when measuring the surface tension of which it is necessary to take into account the influence on its value of many factors, the main ones being dispersion and sedimentation. These factors have a significant effect on the measured value of surface tension. The non-equilibrium of the system under study leads to a time dependence of the surface tension, which significantly complicates the measurement of its dependence on temperature. To measure the surface tension of a bentonite suspension, a new method based on the superposition of measurement results obtained by two independent methods, the hanging drop method and the lying drop method, has been developed and tested. Sedimentation, when using these methods, leads to oppositely directed (relative to the surface) processes: in the first case, the surface of the drop enriches the particles of the solid phase, in the second – is impoverished. Experimental studies of the time dependences of surface tension have shown that in the hanging drop method there is a linear decrease in surface tension, in the lying drop method the surface tension increases linearly with time. Superposition of the results obtained by these methods allows us to find the value of surface tension at a given time. An analysis of surface tension measurement errors of the influence of various factors on the error in measuring surface tension of the developed method is carried out.

Keywords: surface tension, dispersed phase, dispersion medium, bentonite suspension, measurement methods, lying drop, hanging drop, sedimentation, random and systematic measurement error

Acknowledgments: the authors are thankful to the anonymous reviewer for his valuable remarks.

The authors declare no conflict of interest.

For citation. *R. H. Dadashev, R. S. Dzhambulatov* On the methodological features and errors of measuring the surface tension of aqueous suspensions. *Adyghe Int. Sci. J.* 2022. Vol. 22, No. 4. P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.47928/1726-9946-2022-22-4-57-66>

© Dadashev R. H.,
Dzhambulatov R. S., 2022

Введение

Для решения многих практически важных проблем необходимы надежные данные по поверхностным свойствам используемых материалов [1]–[12]. Подавляющее большинство существующих методов измерения поверхностного натяжения (σ) предназначены для исследования равновесных двухфазных систем [12]. При этом недостаточно разработанными остаются методы измерения поверхностных свойств дисперсных систем, к которым относятся и суспензии бентонитов. В частности, практически неразработанной остается методика измерения σ суспензий бентонитов, учитывающая влияние на величину σ непрерывных процессов диспергирования и седиментации частиц. В связи с этим разработка новых и усовершенствование имеющихся методов определения σ дисперсных систем, к которым относится и суспензии бентонитов, является актуальной задачей.

Суспензия бентонита представляет собой полидисперсную систему, в которой протекают такие процессы как диспергирования и седиментация. В результате действия этих процессов происходит изменение размеров и содержания частиц твердой фазы в поверхностном слое, что оказывает влияние на значение σ суспензии. При разработке методики измерения σ суспензии бентонитов, прежде всего, необходимо иметь в виду, что эти системы имеют сложную структуру и химический состав, они отличаются неравновесностью, обусловленной указанными процессами. Непрерывно протекающие процессы седиментации и диспергирования приводят к временной зависимости σ суспензии, что создает значительные трудности при разработке надежных методов измерения σ дисперсных систем. Этим, в частности, обусловлена недостаточная изученность целого ряда практически важных свойств бентонитов [4]–[11].

В суспензии бентонитов существуют несколько границ раздела фаз. Это – границы раздела фаз: твердое тело – жидкость, твердое тело – газ (воздух), жидкость – газ (воздух). Под поверхностью суспензии мы подразумеваем границу раздела жидкость – воздух, которая является объектом исследования в данной работе.

Обзор литературы

Принято считать, что частицы твердой фазы не участвуют в формировании поверхностного слоя и не оказывают существенного влияния на величину σ суспензии бентонита. В научной литературе особенности на изотермах σ суспензии бентонита обычно связывают не с наличием частиц твердой фазы, а с составом жидкой фазы, наличием избыточных зарядов на поверхности [13], влиянием электролитов [7]. Однако имеющиеся экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в сочетании с коллоидными частицами, частицы твердой фазы могут оказать существенное влияние на величину σ [4]–[6], [14]. С другой стороны, как отмечено выше, в результате непрерывно протекающих неравновесных процессов (диспергирование и седиментация) частицы твердой фазы, в зависимости от метода измерения σ , оседают или покидают поверхность. Эти процессы приводят к изменению формы (контура) капли, что отражается на величине измеряемого значения σ .

Исходя из вышеизложенного, методы измерения σ суспензии можно разбить на две группы. К первой группе можно отнести методы, в которых процесс измерения σ сопровождается седиментацией частиц твердой фазы на поверхность (метод висящей капли, сталагмометрический метод). Ко второй группе относятся методы, в которых частицы твердой фазы, в результате седиментации уходят из поверхностного слоя, т. е. поверхность со временем обедняется грубодисперсными частицами (методы лежащей капли, максимального давления в газовом пузырьке или в капле, метод капиллярного поднятия и другие).

При использовании любого из указанных методов экспериментатор столкнется с проблемами, связанными с непрерывным изменением содержания твердых частиц в поверхностном слое. Поэтому, прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям поверхностных свойств суспензии, необходимо разработать эффективные способы учета влияния этих факторов на измеряемое значение σ .

Для решения поставленной проблемы нами изучена зависимость σ суспензии бентонита от времени формирования капли двумя независимыми методами: лежащей и висящей капли. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2, откуда видно, что значения σ , полученные методом лежащей капли, со временем увеличиваются (рис. 1), а при измерениях σ методом висящей капли поверхностное натяжение со временем уменьшается (рис. 2). При этом увеличение содержания твердой фазы в суспензии приводит, при сохранении линейной зависимости σ от времени, к увеличению абсолютного значения углового коэффициента. Эти закономерности изменения σ со временем обусловлены тем, что в методе лежащей капли концентрация частиц твердой фазы в поверхности в результате седиментации уменьшается, что приводит к увеличению σ , а при измерении σ методом висящей капли поверхность, наоборот, обогащается частицами твердой фазы.

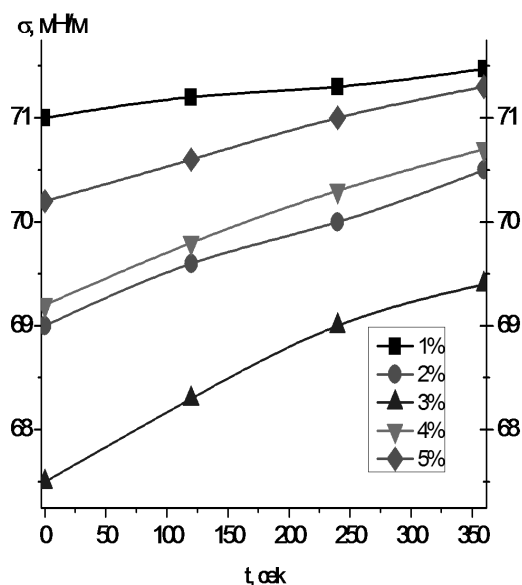


Рис. 1. Зависимость σ суспензии бентонита с различным содержанием твердой фазы от времени формирования капли при 298 К (метод лежащей капли)

Fig. 1. Dependence of σ of a suspension of bentonite with different solids content on the time of drop formation at 298 K (seated drop method)

Капля под действием осевших на поверхность твердых частиц вытягивается, что фиксируется прибором как снижение величины σ .

Таким образом, при измерении σ суспензии бентонитов экспериментатор сталкивается с проблемами, обусловленными динамическим характером σ , чем обусловлена зависимость σ от времени формирования капли. Использование для этих целей динамических методов измерения поверхностного натяжения [12] не всегда оправдано и требует специальных исследований.

Для решения этой задачи нами предложена новая методика, которая позволяет учесть влияние седиментации на измеряемое значение σ суспензии. Сущность этого метода за-

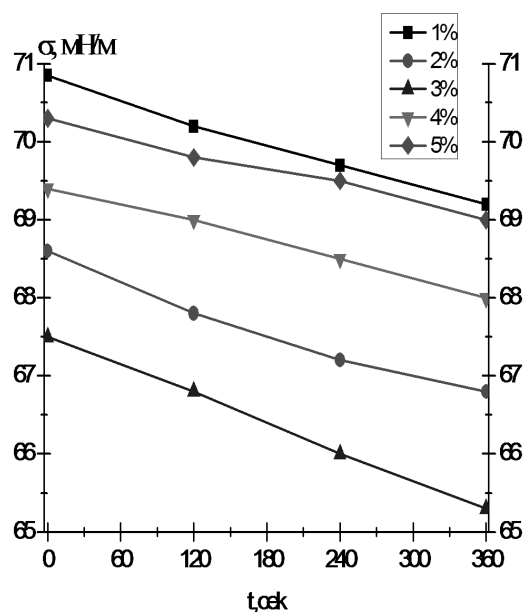


Рис. 2. Зависимость σ суспензии бентонита с различным содержанием твердой фазы от времени формирования капли при 298 К (метод висящей капли)

Fig. 2. Dependence of σ of bentonite suspension with different solids content on the time of drop formation at 298 K (hanging drop method)

ключается в том, что измерения σ проводятся двумя независимыми методами: методами висящей и лежащей капли [15]. Процесс седиментации при использовании этих способов измерений протекает в противоположных направлениях: в первом случае поверхность капли обогащается частицами твердой фазы, во втором – обедняется. В результате действия этих процессов временные зависимости σ в этих двух случаях демонстрируют противоположные изменения, а именно, при использовании метода висящей капли наблюдается линейное (в пределах погрешности измерений) уменьшение σ (рис. 2), а при использовании метода лежащей капли σ линейно возрастает со временем (рис. 1). При этом коэффициенты временной зависимости σ , в пределах погрешности измерения, по абсолютной величине равны.

Следует отметить, что на значение σ суспензии может также оказать влияние подложка, на которой формируется лежащая капля. В наших исследованиях в качестве подложки используется рекомендованная производителем прибора DSA-100 [15] стандартная фторопластовая пластина. Об отсутствии заметного влияния подложки на величину σ суспензии свидетельствует тот факт, что значения σ суспензии, полученные методом лежащей капли (капля располагается на подложке), и висящей капли (капля висит на кончике стального капилляра), в пределах погрешности эксперимента совпадают. На рис. 3 представлены экспериментальные данные по временной зависимости σ суспензии бентонита (концентрация твердой фазы 3 масс %), полученные двумя независимыми методами (методами висящей и лежащей капли). Для сравнения на том же рисунке представлена временная зависимость σ , полученная суперпозицией (усреднением) результатов, полученных в данный момент времени разными методами.

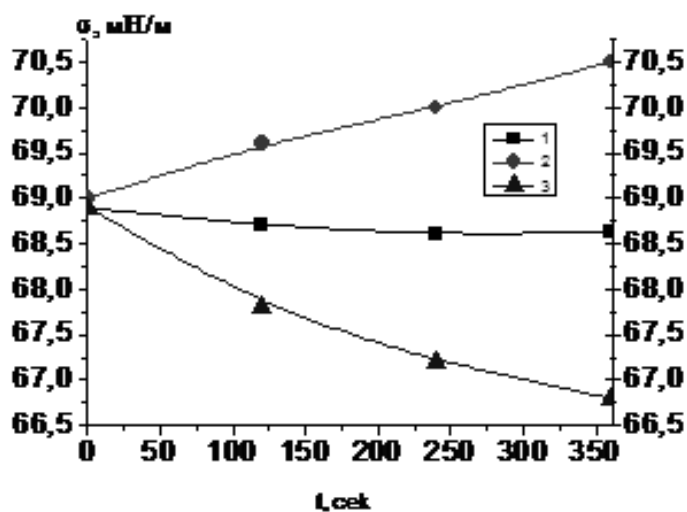


Рис. 3. Временная зависимость поверхностного натяжения суспензии бентонита при 298 К (3 масс. % твердой фазы): 1– усредненные значения; 2 – метод лежащей капли; 3 – метод висящей капли.

Fig. 3. Time dependence of the surface tension of a suspension of bentonite at 298 K (3 wt. % of the solid phase): 1 – averaged values; 2 – sessile drop method; 3 – hanging drop method.

Как видно из рисунка (прямые 2 и 3), углы наклона прямых, характеризующих зависимость σ от времени выдержки капли ($\sigma(t)$) относительно горизонтальной прямой, по абсолютному значению равны, а усредненные значения рис. 3, в изученном интервале времени, в пределах погрешности измерения не зависят от времени.

Результаты исследования

Для апробации разработанной методики экспериментально изучены временные зависимости поверхностного натяжения ($\sigma(t)$) суспензии бентонитов, которые отличаются друг от друга только содержанием частиц твердой фазы. Как видно из рис. 4, значения σ , полученные методом суперпозиции результатов, полученных методами лежащей и висящей капли, в пределах погрешности измерения не зависят от времени, что позволяет получать достоверные экспериментальные данные по σ суспензии в данный момент времени.

Очевидно, что эффективное использование предложенной методики на практике требует детального анализа погрешностей измерения σ .

Известно, что систематическая ошибка, за исключением специальных случаев, не меняется в процессе измерения. Поэтому разброс экспериментальных данных по величине σ будет определяться только случайной составляющей общей ошибки измерения. Систематическая ошибка измерения σ тензиометром DSA-100 «KRUSS», согласно данным производителя, равна 1% [15]. Значения σ суспензий бентонита лежат в диапазоне 50–70 мН/м. Следовательно, абсолютное значение систематической погрешности измерения σ суспензии бентонита тензиометром DSA-100 «KRUSS» составляет ± 0.7 мН/м.

Для оценки случайной погрешности измерения физической величины разработаны несколько подходов [16]. Одним из наиболее надёжных из них является метод, который базируется на вычислении среднеквадратичной ошибки измерения физической величины. При этом с увеличением количества измерений, случайная составляющая общей ошибки измерения уменьшается до определенного статистического предела.

В тензиометре DSA-100 предусмотрена возможность многократного измерения σ в

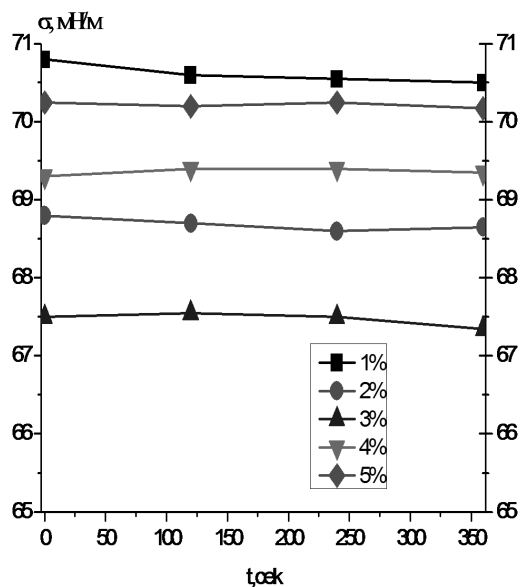


Рис. 4. Временная зависимость поверхностного натяжения суспензии бентонита с различным содержанием частиц твердой фазы при 298 К. Прямые получены усреднением результатов измерения σ методами лежащей и висящей капли.

Fig. 4. Time dependence of the surface tension of a suspension of bentonite with different content of solid particles at 298 K. Straight lines are obtained by averaging the results of measuring σ by the sessile and hanging drop methods.

автоматическом режиме, что позволяет получать необходимое количество экспериментальных данных в течение короткого промежутка времени. Увеличение массива экспериментальных данных приводит к значительному снижению величины случайной ошибки. При этом необходимо иметь в виду, что эту ошибку достаточно снизить до тех пор, пока она не станет существенно ниже систематической ошибки измерения прибора.

Исходя из этого, для определения случайной ошибки измерений σ водной суспензии бентонита были использованы результаты многократных измерений σ водных суспензий бентонита (3-4 серии по 30 измерений в каждой). Согласно полученным экспериментальным данным, максимальный разброс значений σ наблюдается для суспензий бентонитов с содержанием твердой фазы 3 масс. %. Поэтому для статистической обработки нами использованы результаты измерения σ этой суспензии бентонита. Использованные экспериментальные данные представлены в таблице.

Среднюю квадратичную ошибку измерений определяли по выражению:

$$S_n^2 = \sqrt{\frac{\sum(x - x_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $x - x_i$ – отклонение величины единичного измерения от среднего значения; n – общее число измерений. Расчеты показали, что значение погрешности измерения σ равна $S_n = 0.31$ мН/м. Поскольку коэффициент Стьюдента при 30 измерениях равен 2, то средняя квадратичная ошибка измерения ($\Delta\sigma$) (при концентрации 3% твердой фазы бентонита) равна $\pm 0,62$ мН/м.

Таблица 1. Поверхностное натяжение суспензии бентонита при концентрации твердой фазы 3 масс. %

Table 1. The surface tension of a suspension of bentonite at a solid phase concentration of 3 wt. %.

п-число измерений	σ , мН/м	п-число измерений	σ , мН/м	п-число измерений	σ , мН/м
1	59,30	11	59,40	21	59,43
2	59,27	12	59,27	22	59,32
3	59,23	13	59,26	23	59,20
4	59,25	14	59,23	24	59,70
5	59,40	15	59,20	25	59,50
6	58,90	16	58,74	26	58,80
7	58,70	17	58,73	27	58,65
8	58,40	18	58,44	28	58,42
9	58,10	19	58,12	29	58,15
10	57,46	20	57,80	30	57,71
Среднее значение			59,10 мН/м		

Заключение

Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований и анализа полученных данных, в работе показано, что влияние седиментации на измеряемое значение σ можно существенно снизить, если провести измерения поверхностного натяжения двумя независимыми методами: висящей и лежащей капли.

Остальные факторы, оказывающие влияние на поверхностное натяжение суспензии, можно отнести к категории случайных. Значения этих погрешностей можно уменьшить до тех пор, пока суммарная ошибка измерения σ суспензии бентонитов не будет определяться систематической ошибкой измерения σ прибором DSA-100. При этом измерение поверхностного натяжения двумя независимыми методами и усреднение полученных результатов может уменьшить и величину систематической ошибки измерения σ , так как частично сводит эту погрешность в категорию случайной. В итоге, разработанная методика измерения σ суспензии значительно повышает точность и воспроизводимость полученных экспериментальных данных.

Список использованных источников

1. *Dadashev R., Kutuev R., Elimkhanov D.* Analytical description of concentration dependence of surface tension in multicomponent systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 98, No. 6. Art. 062029.
2. *Алчагиров Б. Б., Дадашев Р. Х., Дышекова Ф. Ф., Элимханов Д. З.* Поверхностное натяжение индия. Методы и результаты исследований // *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52, № 6. С. 941–960.
3. *Дадашев Р. Х., Хоконов Х. Б., Элимханов Д. З., Бичуева З. И.* Концентрационная зависимость поверхностного натяжения двойных систем // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2007. Т. 71, № 2. С. 264–266.
4. *Dadashev R. H., Dzhambulatov R. S., Elimkhanov D. Z.* Effect of Nanoscale Particles on the Surface Properties of Aqueous Suspensions of Bentonites. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2018. V. 82, No. 7. P. 902–904.
5. *Nanda K., Bulk K.* Cohesive energy and surface tension from the size-dependent evaporation study of nanoparticle. *Applied Physics Letters*. 2005. V. 87. P. 21–29.

6. *Van Olphen H.* Forces between suspended bentonite particles. Shell Development Company. Exploration and prediction research division. Huston. 2008. No. 62. P. 204–224.
7. *Шантарин В. Д., Войтенко В. С.* Физико-химия дисперсных систем. М.: Недра, 1990. 315 с.
8. *Витюгин В. М., Фукс О. А., Сомова Т. Н.* Исследование влияния концентрации бентонитовых суспензий на поверхностное натяжение и реологические свойства // Известия Томского политехнического института имени С. М. Кирова. 1977. Т. 214. С. 106–108.
9. *Дадашев Р. Х., Джамбулатов Р. С., Дадашева З. И., Талхигова Х. С.* Влияние некоторых факторов на изотермы поверхностного натяжения водных суспензий бентонита // Известия Кабардино-Балкарского университета. 2019. Т. 9, № 2. С. 48–52.
10. *Джамбулатов Р. С., Дадашев Р. Х., Элимханов Д. З.* Теоретические модели для прогноза поверхностного натяжения растворов диоксан 1.4-ацетон-вода // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2015. № 1(26). С. 5–8.
11. *Дадашев Р. Х., Джамбулатов Р. С., Элимханов Д. З.* О влиянии пространственных структур на свойства поверхности суспензий бентонита // Вестник Академии наук Чеченской республики. № 2 (49). 2020. С. 21–24
12. *Русанов А. И., Прохоров В. А.* Межфазная тензометрия. СПб.: Химия, 1994. 397 с.
13. *Кочурова Н. Н., Русанов А. И., Мырзахметова Н. О.* Эффект Джонса-Рея и поверхностная электризация // Журнал Доклады академии наук СССР. 1991. Т. 316, № 6. С. 1425–1427.
14. *Дадашев Р. Х., Джамбулатов Р. С., Элимханов Д. З.* Особенности концентрационной зависимости поверхностного натяжения водных суспензий бентонитов // Журнал физической химии. 2015. Т. 89, № 8. С. 1338–1340.
15. *Дадашев Р. Х., Джамбулатов Р. С., Элимханов Д. З.* Измерение поверхностного натяжения методом висящей капли на тензиометре DSA-100 // Сборник Труды КНИИ РАН, Грозный, 2012. № 5. С. 3–7
16. *Алентьев А. Н., Ильченко А. Г., Токов А. Ю.* Статистические методы обработки результатов физического эксперимента: уч. пособие. Иваново: 2007. 143 с.

Поступила 24.11.2022; одобрена после рецензирования 22.12.2022; принята к публикации 26.12.2022.

Об авторах:

Дадашев Райком Хасимханович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики Комплексного научно-исследовательского института им. Х. И. Ибрагимова РАН (366002, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. Старопромысловское ш., д. 21 а), действительны член АМАН, ORCID: 0000-0002-0192-5510, Scopus ID 6603898428, raykom50@mail.ru

Джамбулатов Роман Суламбекович, к.ф.-м.н., зав. отделом физико-математических исследований Комплексного научно-исследовательского института им. Х. И. Ибрагимова РАН (366002, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. Старопромысловское ш., д. 21 а), ORCID: 0000-0002-4126-127X, Scopus ID 56205601800, asldzam@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

1. *R. Dadashev, R. Kutuev, D. Elimkhanov* Analytical description of concentration dependence of surface tension in multicomponent systems. Journal of Physics: Conference Series. 2008. V. 98. No. 6. Art. 062029.
2. *B. B. Alchagirov, R. H. Dadashev, F. F. Dyshekova, D. Z. Elimkhanov* Surface tension of India. Methods and results of research. Teplofizika vysokikh temperatur. 2014. V. 52, No. 6. P. 941–960.

3. *R. Kh. Dadashev, Kh. B. Khokonov, D. Z. Elimkhanov, Z. I. Bichueva* Concentration dependence of surface tension of double systems. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physical Series. 2007. V. 71, No. 2. P. 264–266.
4. *R. H. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, D. Z. Elimkhanov* Effect of Nanoscale Particles on the Surface Properties of Aqueous Suspensions of Bentonites. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2018. V. 82, No. 7. P. 902–904.
5. *K. Nanda, K. Bulk* Cohesive energy and surface tension from the size-dependent evaporation study of nanoparticle. Applied Physics Letters, 2005. V. 87. P. 21–29.
6. *Van Olphen H.* Forces between suspended bentonite particles. Shell Development Company. Exploration and prediction research division. 2008. Huston. No. 62. P. 204–224.
7. *V. D. Shantarin, V. S. Voytenko* Physico-chemistry of dispersed systems. Moscow: Nedra, 1990. 315 p.
8. *V. M. Vitiugin, O. A. Fuchs, T. N. Somova* Study of influence of bentonite suspensions concentration on surface tension and rheological properties. Proceedings of Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov. 1977. V. 214. P. 106–108.
9. *R. Kh. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, Z. I. Dadasheva, H. S. Talhigova* The influence of some factors on the surface tension isotherms of aqueous suspensions of bentonite // Proceedings of the Kabardino-Balkarian University. 2019. V. 9, No. 2. P. 48–52.
10. *R. S. Dzhambulatov, R. Kh. Dadashev, D. Z. Elimkhanov* Theoretical models for the prediction of the surface tension of dioxane 1,4-acetone-water solutions. Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic. 2015. No. 1(26). P. 5–8.
11. *R. Kh. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, D. Z. Elimkhanov* The influence of spatial structures on the surface properties of bentonite suspensions. Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic. No. 2 (49). 2020. P. 21–24.
12. *A. I. Rusanov, V. A. Prokhorov* Inter-phase tensometry. SPb: Chemistry, 1994. 397 p.
13. *N. N. Kochurova, A. I. Rusanov, N. O. Myrzakhmetova* The Jones-Reay effect and surface electrification. Journal of the Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1991. V. 316, No. 6. P. 1425–1427.
14. *R. KH. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, D. Z. Elimkhanov* Features of the concentration dependence of the surface tension of aqueous suspensions of bentonite. Journal of Physical Chemistry. 2015. V. 89, No. 8. P. 1338–1340.
15. *R. Kh. Dadashev, R. S. Dzhambulatov, D. Z. Elimkhanov* Measurement of surface tension by the method of a hanging drop on tensiometer DSA-100. Proceedings of KNII RAS, Grozny, 2012. No. 5. P. 3–7.
16. *A. N. Alentjev, A. G. Ilchenko, A. Y. Tokov* Statistical methods of processing the results of physical experiment: tutorial. Ivanovo: 2007. 143 p.

Submitted 24.11.2022; approved after reviewing 22.12.2022; accepted for publication 26.12.2022.

About the authors:

Raykom Khasimkhanovich Dadashev, Ph. Chief Scientific Associate at the Laboratory of Experimental Physics, Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences (21 a, st. Staropromyslovskoe sh., Grozny, Chechen Republic, Russian Federation, 366002), Full member of AIAS, ORCID: 0000-0002-0192-5510, Scopus ID 6603898428, raykom50@mail.ru

Roman Sulambekovich Dzhambulatov, Candidate of Philosophy and Mathematics, Head of the Department of Physical and Mathematical Research of the Kh. I. Ibragimov, (21 a, st. Staropromyslovskoe sh., Grozny, Chechen Republic, Russian Federation, 366002) ORCID: 0000-0002-4126-127X, Scopus ID 56205601800, asldzam@mail.ru

The authors have read and approved the final version of the manuscript.