

УДК 54:544.7

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Вилкова Наталья Георгиевна,**  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Физика и химия»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

Пензенский государственный университет  
Россия, 440026, Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел. (8412) 368209; факс (8412) 368400

**Мишина Светлана Ивановна,**  
кандидат химических наук,  
доцент кафедры «Химия и теория  
и методика обучения химии»  
E-mail: elancv@mail.ru

**Депутатов Евгений Дмитриевич,**  
студент  
E-mail: evgen-depytatov@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Vilkova Natalya Georgievna,**  
Doctor of Chemical Sciences, Professor  
of the department «Physics and Chemistry»  
E-mail: ngvilkova@mail.ru

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.  
tel. (8412) 368209; fax (8412) 368400

**Mishina Svetlana Ivanovna,**  
Candidate of Chemical Sciences, Associate  
Professor of the department «Chemistry  
and Theory and Methodology Teaching  
Chemistry»  
E-mail: elancv@mail.ru

**Deputatov Evgeniy Dmitrievich,**  
Student  
E-mail: evgen-depytatov@mail.ru

## ПЕНЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ОКСИДОМ ТИТАНА: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

Н.Г. Вилкова, С.И. Мишина, Е.Д. Депутатов

Тонкодисперсные порошки различной химической природы могут служить хорошими стабилизаторами дисперсных систем. Наиболее распространенными твердыми веществами-стабилизаторами являются нерастворимые ни в воде, ни в органических жидкостях вещества: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов. Научные исследования таких дисперсных систем в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения: удаление из водной суспензии частиц нанометрических размеров (например, углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические структуры углерода диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров); стабилизация пен в процессах нефтеотдачи EOR (enhanced oil recovery); проявление ярко выраженного антивирусного эффекта нанокompозитами на основе оксида титана и др.

Исследованы свойства пен, содержащих оксид титана, при изменении pH среды и степени гидрофобизации частиц. Показана существенная зависимость возможности образования и времени жизни данных дисперсных систем от водородного показателя. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значениях водородного показателя pH=5, который близок к изоэлектрической (и.э.т.) точке оксида, и возрастании относительной гидрофобизации поверхности от 0,38 до 1,27 ммоль/г. При повышении степени гидрофобизации поверхности до 4,6 ммоль/г и таком же значении pH пенообразование было незначительным ( $h \leq 0,2$  см), а время жизни слоя  $t \approx 10$  с. При pH=5 и 2 максимальные и средние радиусы были меньше по сравнению с размерами частиц в щелочной среде. Однако при pH= 2 пенообразование было незначительным, а пена была малоустойчивой. В частности, при значениях водородного показателя pH=2 и 3 и повышении степени гидрофобизации от 0,15 до 4,6 ммоль/г высота столба пены составляла 0,1-0,2 см, а время ее жизни не превышало 10 минут. Кроме того, положительный заряд поверхности оксида титана в кислых средах, возможно, не обеспечивает химического взаимодействия с ПАВ – гидрофобизатором.

Таким образом, было установлено, что устойчивые пены, содержащие  $\text{TiO}_2$ , могут быть получены только при определенном значении водородного показателя pH=5. При

уменьшении водородного показателя до pH= 2 образуются тонкие слои малоустойчивой пены.

*Ключевые слова: пена, оксид титана, гидрофобные частицы, получение, свойства*

## FOAMS STABILIZED BY TITANIUM OXIDE: OBTAINING AND PROPERTIES

N.G. Vilkova, S.I. Mishina, E.D. Deputatov

Fine powders of different chemical nature can serve as good stabilizers for disperse systems. Usually the most common solid substances – stabilizers are insoluble in water or in organic liquids substances: clay, coal, silica, glass, oxides and hydroxides of many metals. Scientific studies of such dispersed systems are currently due to new opportunities for their use: removal of nanometer-sized particles from an aqueous suspension (for example, carbon nanotubes representing hollow cylindrical carbon structures with a diameter from tenths to several tens of nanometers; improved oil recovery foam (EOR) ); manifestation of a pronounced antiviral effect by nanocomposites based on titanium oxide and others.

In this work, properties of foams containing titanium oxide were obtained and investigated, depending on the pH of the medium and the particles' hydrophobicity. The substantial dependence of the possibility of formation and the lifetime of these dispersed systems on the pH are shown. The most stable systems were formed only at pH values of pH = 5, which is close to the isoelectric (ee) point of the oxide and the increase in the relative hydrophobization of the surface from 0.38 to 1.27 mmol / g. With an increase in the degree of surface hydrophobization to 4.6 mmol/g and the same pH value, foaming was insignificant ( $h \leq 0.2$  cm), and the layer lifetime  $t \approx 10$  sec. At pH = 5 and 2, the maximum and average radii were smaller compared with the particle sizes in an alkaline medium. However, at pH = 2, foaming was insignificant, and the foam was low-resistant foam. In particular, with the values of hydrogen pH=2 and 3 and an increase in the degree of hydrophobization from 0.15 mmol/g to 4.6 mmol/g, the height of the foam column was 0.1-0.2 cm, and its life time did not exceed 10 minutes. In addition, the positive charge of the surface of titanium oxide in acidic media may not provide chemical interaction with surfactant hydrophobizer.

Thus, it was proved that stable foams containing  $\text{TiO}_2$  can be obtained only at a certain value of the hydrogen index pH=5. With the decrease in the hydrogen index to pH = 2, thin layers of low-resistant foam are formed.

*Keywords: foam, titanium oxide, particles' hydrophobicity, obtaining, properties, foam stability*

Тонкодисперсные нерастворимые порошки различной химической природы могут служить хорошими стабилизаторами дисперсных систем, например эмульсий и пен. Обычно в качестве твердых веществ-стабилизаторов используются нерастворимые ни в воде, ни в органических жидкостях вещества: глина, уголь, кремнезем, стекло, оксиды и гидроксиды многих металлов (железа, титана, кальция, цинка и др.). Известно, что частицы твердого стабилизатора адсорбируются на поверхности вода/воздух, образуя межфазный слой, который замедляет процесс диффузионного переноса газа в пене. Причинами устойчивости пен в присутствии твердой фазы являются [1–7]: 1) адсорбция частиц-стабилизаторов и образование межфазных слоев на поверхности пенных пузырьков; 2) капиллярное давление в пенной пленке, содержащей твердую фазу; 3) стерические или электростатические взаимодействия в адсорбционных слоях; 4) механическая прочность и упругость структур, которые формируются в дисперсионной среде обычно в результате взаимодействия твердых частиц, поверхностно-активных веществ и воды.

Образование плотного слоя частиц, которое определяется энергией адсорбции отдельной частицы на межфазной поверхности, рассмотрено в [1, 8]:

$$\Delta G = \pi R^2 \sigma (1 \pm \cos \theta)^2, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус частиц;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкость/газ;  $\theta$  – краевой угол, который образуется при расположении твердой частицы на границе раздела жидкость – газ.

Научные исследования таких дисперсных систем в настоящее время обусловлены новыми возможностями их применения [9–16].

Например, в работе [9] рассматривается устойчивость пен, образованных из водных растворов, содержащих нефтепродукты, при добавлении к ним поверхностно-активного вещества (ПАВ) и диспергированных частиц геля. Устойчивость пены зависела от количества ПАВ, концентрации частиц, содержания солей, концентрации нефти и соотношения газа и жидкости.

Авторы работы [10] для удаления из водной суспензии углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические структуры углерода диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной от одного микрометра до нескольких сантиметров, предложили метод их агрегирования на поверхности раздела нефть / вода. Интересно, что агрегация данных структур на границе раздела органическая жидкость / вода была возможна при определенном значении pH или при добавлении катионного поверхностно-активного вещества. Метод флотации был применен для обработки эмульсий типа «масло-в-воде» (эмульсии O / W), полученных из синтетических масел путем добавления химических веществ, таких, как катионное поверхностно-активное вещество ЦТАБ (цетилтриметиламмонийбромид), и коагулянтов [11]. В работе [12] пенную флотацию, работающую в непрерывном режиме, применяли для очистки нефтесодержащих сточных вод. Использовали модельную эмульсию (загрязняющее масло в воде) и додецилсульфат натрия в качестве пенообразователя. Было изучено влияние электролита, скорости потока воздуха, времени удержания гидравлической жидкости на производительность процесса. Стабилизация пен в процессах нефтеотдачи EOR (enhanced oil recovery) также является актуальной задачей. В таких процессах к растворам поверхностно-активных веществ добавляют полимеры, такие, как частично гидролизованный полиакриламид, гуаровая камедь. В результате исследований установлено, что смесь анионного поверхностно-активного вещества (додецилсульфата натрия) и катионного полимера (поливиниламина) улучшает стабильность пены, но затрудняет процесс пенообразования. Пены, стабилизированные наночастицами, представляют собой перспективные заменители полимеров. В [13] стабильность пены повышена с помощью наночастиц, таких, как оксид кремния и оксид железа в сочетании с полимером – гуаровой камедью. В работе [16] отмечается противовирусное действие  $\text{TiO}_2$ -нанокompозитов на модели культуры клеток, инфицированных вирусом гриппа. Было установлено, что нанокompозиты на основе данного оксида проявляют ярко выраженный антивирусный эффект. Проведенный анализ делает изучение дисперсных систем, содержащих твердую фазу оксида титана, очень актуальным.

Цель работы – получение и изучение свойств пен, содержащих оксид титана, в зависимости от pH среды и степени гидрофобизации частиц.

Для получения дисперсных систем (пен и эмульсий) используют оксиды различной химической природы, которые обычно подвергаются агрегированию в присутствии ПАВ и электролитов. Известно влияние радиуса частиц и фракционного состава исходных суспензий на устойчивость формируемых дисперсных систем. Зависимость радиусов частиц оксида кремния и краевых углов смачивания  $\theta_w$  от концентрации гидрофобизатора ( $C_g$ ) и электролита показана в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость радиусов частиц оксида кремния и краевых углов смачивания  $\theta_w$  от концентрации гидрофобизатора ( $C_g$ ) и электролита

| Состав суспензии               | $R_{\max}$ ,<br>мкм | $R_1$ ,<br>мкм | $R_2$ , мкм<br>(более 50 %) | $\theta_w$ | $C_g$ ,<br>ммоль/л | $n_g$ |
|--------------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|------------|--------------------|-------|
| 1                              | 2                   | 3              | 4                           | 5          | 6                  | 7     |
| 2 %LudoxHS-40                  | 14                  | 8,5            | 12                          | 42         | 40                 | 2     |
| 2 %LudoxHS-40+0,1 моль/л NaCl  | 14                  | 8,5            | 12                          | 46         | 40                 | 2     |
| 2 %LudoxHS-40 +0,01 моль/лNaCl | 11,9                | 5,5            | 5                           | 30         | 10                 | 0,5   |
| 2 %LudoxHS-40 +0,1 моль/л NaCl | 14,8                | 6,5            | 9                           | 39         | 10                 | 0,5   |

| 1                                 | 2    | 3   | 4  | 5  | 6  | 7   |
|-----------------------------------|------|-----|----|----|----|-----|
| 2 % Ludox HS-40 + 0,4 моль/л NaCl | 9,73 | 6,5 | 4  |    | 10 | 0,5 |
| 2 % Аэросил-380 + 0,1 моль/л NaCl | 14,8 | 8,5 | 12 |    | 10 | 0,5 |
| 2 % Аэросил-380 + 0,4 моль/л NaCl | 21   | 10  | 15 | 49 | 10 | 0,5 |

П р и м е ч а н и е :  $R_{\max}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  – максимальный, средний и радиус частиц во фракциях с содержанием более 50 %.

Как видно из табл. 1, повышение степени гидрофобизации людокс от 0,5 до 2 при одинаковой концентрации электролита увеличивало значение краевого угла смачивания от  $39^\circ$  до  $46^\circ$ . Изменение краевых углов оттекания воды в суспензиях следующего состава: 2 % людокс с добавкой электролита и без него – на границах раздела вода – воздух и вода – октан подробно рассмотрено в работе [14]. Приведенные значения средних радиусов частиц, определенные седиментационным анализом, изменялись от 5,5 до 8,5 мкм в суспензиях людокс при изменении концентрации электролита и гексилamina (см. табл. 1). Очевидно, что пленки толщиной 12,9 мкм и 13,1 мкм, полученные из суспензий составов 2 % и 20 % людокс ( $C_g = 55$  ммоль/л и 22 ммоль/л гексилamina,  $C_{\text{NaCl}} = 0,1$  моль/л), образованы двумя слоями гидрофобизованных частиц. Подобная структура пленок сохраняется при изменении степени гидрофобизации поверхности 20 % людокс от 0,055 до 0,22 ммоль/г. Такие пленки при утоньшении полностью разрушаются, объемные пены также малоустойчивы. Отметим, что при дальнейшем повышении степени гидрофобизации поверхности устойчивость пен возрастала, что обусловлено гелеобразованием в пенных пленках. Повышение степени гидрофобизации аэросила с массовым содержанием твердой фазы 2-4 % приводило к росту среднего радиуса агрегированных частиц и устойчивости пен. Например, при повышении степени гидрофобизации поверхности от 1,85 до 2,45 ммоль/г процент разрушения пенного слоя снижался от 70 до 45 %. Как видно из табл. 1, средний радиус частиц 2 % аэросила составлял 8,5 и 10 мкм при  $C_{\text{NaCl}} = 0,1$  моль/л и 0,4 моль/л соответственно и малой степени гидрофобизации (0,5 ммоль/г). Агрегации аэросила при степени гидрофобизации поверхности 2,5 ммоль/г уже соответствуют средние радиусы частиц 65-70 мкм, пленки толщиной более 100 мкм и высокоустойчивые пены. Пены с содержанием аэросила 2 % и  $n_g = 0,9-2,75$  очень устойчивы и существуют несколько месяцев при условии отсутствия каких-либо внешних воздействий. При увеличении концентрации гексилamina до 60 мМ ( $n_g = 3$ ) время жизни пен снижалось до 2 суток, а при дальнейшем росте концентрации гексилamina ( $n_g \geq 4,75$ ) пены разрушались мгновенно. Одной из причин ускоренного разрушения считали рост радиуса агрегатов выше 100 мкм [6]. Таким образом, существует определенное значение степени гидрофобизации поверхности, превышение которого делает пену неустойчивой. Для пен, полученных из более концентрированных суспензий, например 4 %  $\text{SiO}_2$ , при увеличении степени гидрофобизации поверхности до  $n_g = 1,63$  наблюдается переход пены в гель, который в гравитационном поле живет сколь угодно долго. Но при дальнейшем увеличении количества гидрофобизатора (для 4 % > 120 мМ,  $n_g$  более 3) вязкость системы начинает снижаться, и в результате образуется подвижная суспензия, при встряхивании которой получается объемная, но быстро разрушающаяся пена [17]. Устойчивость пен из кремнезема может сильно снижаться при увеличении относительной степени гидрофобизации  $n_g \geq 3$  как вследствие роста средних радиусов частиц до 100 мкм, так и по причине снижения вязкости суспензии [17]. Необходимо отметить, что для указанных форм оксида кремния изоэлектрическая точка и точка нулевого заряда соответствуют значению водородного показателя  $\text{pH} = 1,8-2,2$  [18].

При  $\text{pH} < 2$  частицы заряжены положительно, а при  $\text{pH} > 2$  – отрицательно. При добавлении гексилamina к суспензиям кремнезема (даже в самых малых количествах) значения водородного показателя соответствовали щелочной области. В частности, в суспензиях людокс с массовым содержанием кремнезема 3 % и при концентрациях гидрофобизатора 10; 20; 40 ммоль/л  $\text{pH} = 8, 10, 11$  соответственно. То есть во всех

опытах взаимодействие гексиламина происходило с отрицательно заряженной поверхностью кремнезема.

Исследование устойчивости пен, содержащих оксид титана, показало существенную зависимость возможности образования и времени жизни данных дисперсных систем от водородного показателя. Наиболее устойчивые системы образовывались только при значении водородного показателя  $pH=5$ , который близок к изоэлектрической (и.э.т.) точке оксида. Значение и.э.т. составляет 6,3 и 5,8 ( $\pm 0,2$ ) при изменении концентрации электролита  $KNO_3$  от 0,001 до 0,1 моль/л [15]. Зависимость величины электрокинетического потенциала золя оксида титана (в форме анатаза) от  $pH$  при добавлении 0,2 М раствора гидроксида лития была проанализирована в [16]. Установлено, что при повышении  $pH$  золь меняет заряд (противоион  $H^+$  меняется на  $OH^-$ ) и проходит через изоэлектрическую точку при  $pH=5$ . Очевидно, что повышение  $pH$  выше изоэлектрической точки не только приводит к перезарядке поверхности, но и может сопровождаться пептизацией. Подобным образом наиболее устойчивые дисперсные системы образовывались при значении водородного показателя, который близок к изоэлектрической точке гидроксида алюминия. Известно, что растворы солей алюминия (сульфат алюминия, хлорид алюминия) образуют золи различного заряда при изменении реакции среды. В частности, при добавлении щелочи до  $pH = 5$  образуется золь гидроксида алюминия. Точка нулевого заряда частиц  $Al(OH)_3$ , приготовленных выщелачиванием водорастворимых солей алюминия, равна 6,7 [19]. Отметим также, что пены получались только при добавлении масляной кислоты к раствору сульфата алюминия и дальнейшем изменении  $pH$  до 4,8-5 двумолярным раствором гидроксида натрия [17].

В табл. 2 представлены устойчивые пены, стабилизированные оксидом титана, полученные при  $pH = 5$  и возрастании относительной гидрофобизации поверхности от 0,38 до 1,27 ммоль/г.

Т а б л и ц а 2

Устойчивость пен, содержащих оксид титана

| Массовое содержание оксида титана, % | Степень относительной гидрофобизации поверхности $n_g$ , ммоль/г | Время жизни, сут | Высота столба пены, см |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| 19,2                                 | 0,399                                                            | 4-7              | 1                      |
| 20                                   | 0,38                                                             | 3                | 1                      |
| 10                                   | 0,76                                                             | 3                | 2                      |
| 6                                    | 1,27                                                             | 3                | 0,7                    |

При повышении степени гидрофобизации поверхности до 4,6 ммоль/г и таком же значении  $pH$  пенообразование было незначительным ( $h=0,2$  см), а время жизни слоя  $t \approx 10$  с. Методом седиментации изучено распределение частиц по размерам, которые образуются при взаимодействии оксида титана с гексиламином в средах с различными значениями водородных показателей.

Т а б л и ц а 3

Радиусы частиц гидрофобизованного оксида титана.

Состав суспензии:  $TiO_2$  (0,736 % масс.) + 7,5 ммоль/л гексиламина,  $n_g=1$  ммоль/г

| № | $pH$              | $R_{min}$ | $R_{max}$ | $R_{cp}$ |
|---|-------------------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 2-3               | 4,3       | 13        | 8,65     |
| 2 | 5                 | 2         | 11,8      | 6,9      |
| 3 | 9,5-10            | 1-2       | 21        | 11       |
| 4 | 2-3<br>электролит | 2         | 9,2       | 5,6      |

Для объяснения возможных причин значительного изменения устойчивости пен, содержащих оксид титана, с изменением водородного показателя было изучено рас-

пределение частиц методом седиментационного анализа. Установлено, что при значении водородного показателя 9,5 доля частиц радиусом 2 мкм и менее составляла 25 %, одновременно максимальный и средний радиусы составляли 21 и 11 мкм соответственно; значение краевого угла смачивания частиц было равно  $40,75^\circ$ . В работах [17, 20, 21] представлен анализ влияния размера частиц на устойчивость пен. Показано, что мелкие частицы твердых веществ не приводят к формированию устойчивых пен, как и частицы больших размеров. Кроме того, установлено [4], что максимальная устойчивость тонких слоев пены, полученной из суспензии, включающей людокс и гексилламин, соответствует гелеобразованию в пенной пленке и наблюдается при максимальной степени гидрофобизации твердых частиц, соответствующей краевому углу  $46^\circ$ . Необходимо подчеркнуть, что гидрофобизация частиц людокса гексилламином, превышающая краевой угол  $50^\circ$ , сопровождалась коагуляцией и не приводила к образованию устойчивых пен. Подобный результат наблюдался и при гидрофобизации частиц аэросила. Вероятно, отсутствие гелеобразования в дисперсионной среде пен, образованных гидрофобным оксидом титана, не приводит к повышению их устойчивости даже при больших значениях краевого угла смачивания.

При pH=5 и 2 максимальные и средние радиусы были меньше ( $r_{\max} = 11,8$  и  $13$ ,  $r_a = 6,9$  и  $8,5$  соответственно) по сравнению с размерами частиц в щелочной среде, однако низкие ( $14,68^\circ$ ) значения краевого угла их смачивания при pH = 2 могут являться причиной малой устойчивости пен в кислой среде.

В частности, при значениях водородного показателя 2 и 3 и повышении степени гидрофобизации от 0,15 до 4,6 ммоль/г пенообразование было незначительным (высота столба пены составляла 0,1-0,2 мм), а время ее жизни не превышало 10 минут. Кроме того, положительный заряд поверхности оксида титана в кислых средах, возможно, не обеспечивает химического взаимодействия с ПАВ – гидрофобизатором.

Таким образом, было установлено, что устойчивые пены, содержащие оксид титана, могут быть получены только при значениях водородного показателя pH = 5. Низкие значения краевого угла смачивания частиц-стабилизаторов ( $\Theta=14,68^\circ$ ) при pH = 2 могут являться причиной малой устойчивости пен в кислой среде.

#### Список литературы

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol.165, N. 2. – P. 108–116.
4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendelevov Communication*. – 2011. – Vol.21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendelevov Communication*. – 2012. – Vol.22, N 4. – P. 227–228.
6. Вилкова, Н.Г. Влияние гидрофобности частиц кремнезема на устойчивость пен и пенных пленок / Н.Г. Вилкова, С.И. Еланева // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 62–66.
7. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–401.

8. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
9. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel / G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* – 2016. – Vol.497. – P. 214–224.
10. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.129, N 29. – P. 113–120.
11. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.122. – P. 231–241.
12. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol.107, N 2. – P. 118–128.
13. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO<sub>2</sub> foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol.524. – P. 17–27.
14. Вилкова, Н.Г. Влияние электролита на снижение межфазного натяжения и изменение краевого угла смачивания / Н.Г. Вилкова, А.В. Нуштаева, Л.С. Горбунова // *Известия вузов. Поволжский регион. Естественные науки*. – 2014. – №1 (5). – С. 52–59
15. Русакова, С.М. / Изучение свойств TiO<sub>2</sub> в контексте решения научно-практических проблем промышленного производства / С.М. Русакова, И.Г. Горичев, И.В. Артамонова, Е.О. Забенькина // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2010. – №2 (10). – С. 179–185.
16. Бессуднова, Е.В. Синтез и исследование наноразмерных частиц диоксида титана для применения в катализе и нанобиотехнологиях: дис. ... канд. хим. наук / Е.В. Бессуднова. – Новосибирск: Институт катализа им. Г. К. Борескова, 2014.
17. Мишина, С.И. Исследование устойчивости и синерезиса пен, стабилизированных частицами коллоидального кремнезема и гидроксида алюминия: дис. ... канд. хим. наук / С.И. Мишина. – М.: Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, 2013.
18. Айлер, Р.К. Химия кремнезема: Растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: пер. с англ / Р.К. Айлер; ред. пер. В.П. Прянишников. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
19. Kosmulski, M. The pH-dependent surface charging and the point of zero charge / M. Kosmulski // *Journal of Colloid Interface Sciences*. – 2002. – Vol.253. – P. 77–87.
20. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // *Mendelev commun.* – 2013. – Vol.23. – N 3. – P. 155–156.
21. Вилкова, Н.Г. Агрегация гидрофобизованных частиц кремнезема и ее влияние на устойчивость образующихся дисперсных систем / Н.Г. Вилкова, В. Дорчина, А.А. Шумкина, М. А. Карев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2014. – № 2 (19). – С. 30–35.

### References

1. Aveyard, R. Emulsions stabilized by solely colloidal particles / R. Aveyard, B.P. Binks, J. Clint // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 100–102. – P. 503–546.
2. Binks, B.P. Phase inversion of particle-stabilized materials from foams to dry water / B.P. Binks, R. Murakami // *Nature Materials*. – 2006. – Vol. 5. – P. 865–869.
3. Kruglyakov, P.M. About mechanism of foam stabilization by solid particles / P.M. Kruglyakov, S.I. Elaneva, N.G. Vilkova, S.I. Karakashev // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol.165, N. 2. – P. 108–116.

4. Vilkova, N.G. Foam films from hexylamine stabilized by the silica particles / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, P.M. Kruglyakov, S.I. Karakashev // *Mendeleev Communication*. – 2011. – Vol.21, N 6. – P. 344–345.
5. Vilkova, N.G. Effect of hexylamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by ludox / N.G. Vilkova, S.I. Elaneva, S.I. Karakashev // *Mendeleev Communication*. – 2012. – Vol.22, N 4. – P. 227–228.
6. Vilkova, N.G. Influence of silica particles on foams and foam films stability / N.G. Vilkova, S.I. Elania // *Vestnik of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. – 2013. – Vol. 56, No. 9. – P. 62-66.
7. Kaptey, G. On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptey // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2006. – Vol.282–283. – P. 387–401.
8. Kruglyakov, P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications / P.M. Kruglyakov. – Amsterdam: Elsevier, 2000. – 391 p.
9. Zhao, G. Stability mechanism of a novel three-phase foam by adding dispersed particle gel /G. Zhao, C. Dai, D. Wen, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* – 2016. – Vol.497. – P. 214–224.
10. Lili, G. Separation of dispersed carbon nanotubes from water: effect of pH and surfactants on the aggregation at oil/ water interface / G. Lili, Y. Huayi, Z. Hua, M. Xuhui // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.129, N 29. – P. 113–120.
11. Karhu, M. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions / M. Karhu, T. Leiviskä, J. Tanskanen // *Separation and Purification Technology*. – 2014. – Vol.122. – P. 231–241.
12. Apichay, B. Cutting oil removal by continuous froth flotation with packing media under low interfacial tension conditions / B. Apichay, P. Orathai, N. Suchaya, C. Jittipan // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol.107, N 2. – P. 118–128.
13. Emrani, A.S. An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO<sub>2</sub> foam / A.S. Emrani, H.A. Nasr-El-Din // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol.524. – P. 17–27.
14. Vilkova, N.G. The effect of electrolyte on reducing interfacial tension and changing the wetting angle / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva, L.S. Gorbunova // *News of universities. Volga region. Natural Sciences*. – 2014. – N 1 (5). – P. 52–59
15. Rusakova, S.M. / Studying the properties of TiO<sub>2</sub> in the context of solving scientific and practical problems of industrial production / S.M. Rusakova, I.G. Gorichev, I.V. Artamonova, E.O. Zabenkina // *News MGTU «MAMI»*. – 2010. – N2 (10). – P. 179–185.
16. Bessudnova, E.V. Synthesis and study of titanium dioxide nanoparticles for use in catalysis and nanobiotechnology: dis. ... cand. chemical sciences. – Novosibirsk: Institute of Catalysis G. K. Boreskova, 2014.
17. Mishina, S.I. Investigation of the stability and syneresis of foams stabilized by particles of colloidal silica and aluminum hydroxide: dis. ... cand. chemical sciences. – M.: Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov, 2013.
18. Ailer, R.K. Chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloidal and surface properties, biochemistry: translation from English / R.K. Ailer; editorial translation by V.P. Pryanishnikov. – M.: Mir, 1982. – 416 p.
19. Kosmulski, M. The pH-dependent surface charging and the point of zero charge / M. Kosmulski // *Journal of Colloid Interface Sciences*. – 2002. – Vol.253. – P. 77–87.
20. Vilkova, N.G. Influence of hydrophobized solid particles on the reduction of the interfacial tension or surface tension / N.G. Vilkova, A.V. Nushtaeva // *Mendeleev commun*. – 2013. – Vol.23. – N 3. – P. 155–156.
21. Vilkova, N.G. Aggregation of hydrophobic silica particles and its effect on the stability of the resulting dispersed systems / N.G. Vilkova, O.V. Dorchina, A.A. Shumkina, M.A. Karev // *Regional architecture and engineering*. – 2014. – N 2 (19). – P. 30–35.