

УДК 544.773

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ПЕНУ

¹Вилкова Н.Г., ²Мишина С.И., ¹Вилкова А.С.

¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, e-mail: ngvilkova@mail.ru;

²Пензенский государственный университет, Пенза, e-mail: elancv@mail.ru

Приведены уравнения, которые позволяют описать течение дисперсионной среды по каналам Плато – Гиббса пены (уравнение Леонарда – Лемлиха, Десаи и Кумара, Нгуйена). Использован метод создания пониженного давления в каналах Плато пены с помощью пористых пластин – Foam Pressure Drop Technique (FPDT). Описаны устройства для экспериментального исследования течения растворов ПАВ через пену. Проведено сравнение экспериментальных скоростей течения растворов ПАВ с теоретическими при выполнении следующих условий: поверхность канала тангенциально неподвижна, гидропроводность носит чисто каналовой характер. Показано, что полную неподвижность поверхности канала наблюдали в пенах, полученных из ионогенного ПАВ додецилсульфата натрия (DDSNa) с ньютоновскими черными пленками при радиусе канала 30 мкм, а также в пене из DDSNa с добавкой желатины и лаурилового спирта. Для указанных пен экспериментальная (v_r) скорость течения раствора ПАВ совпадает с рассчитанной по уравнениям Леонарда – Лемлиха, Нгуйена и зависимости Десаи и Кумара. Перспективным является изучение нестационарного синерезиса в пенах, стабилизированных твердыми частицами, с применением приведенных в обзоре методов.

Ключевые слова: пена, канал Плато, течение жидкости

LIQUID FLOW THROUGH THE FOAM

¹Vilkova N.G., ²Mishina S.I., ¹Vilkova A.S.

¹Penza state university of architecture and building, Penza, e-mail: ngvilkova@mail.ru;

²Penza state university, Penza, e-mail: elancv@mail.ru

The equations that allow us to describe for the liquid flow through the Plateau-Gibbs border are present (Leonard Lemlih and Nguyen equations and the dependence of Desai and Kumar). The method of creating a low pressure drop in the Plateau borders of the foam using porous plate (Foam Pressure Drop Technique FPDT) was used. The devices for the experimental studies of the liquid flow through the foam are described. A comparison of the experimental flow rates of surfactant solutions with theoretical under the following conditions: the surface of the border is tangentially immobile, transmissibility is purely channel dominated. It is shown that complete immobility of the border surface observed in the foams derived from the ionic surfactant sodium dodecyl sulfate (DDSNa) with a black nyuton's film at radius 30 mm, and in the same foam with the addition of gelatin and lauryl alcohol. For these foams the experimental flow velocity coincides with that calculated using the equations Leonard Lemlih, Nguyen and depending Desai and Kumar. Promising is the study of unsteady syneresis in foams stabilized by solid particles, using the methods given in the review.

Keywords: foam, Plateau border, liquid flow

Важным процессом, определяющим поведение пен и, в частности, их устойчивость, является синерезис. Наиболее полный анализ данного процесса и дифференциальное уравнение синерезиса даны в работах Кротова [1–4]. В работе [1] показано, что коэффициент синерезиса определяется величиной локальной гидропроводности пены H^Γ , которая складывается из гидропроводности каналов и пленок ($H^\Gamma = H_b^\Gamma + H_f^\Gamma$). Ее значение известно при условии тангенциальной неподвижности поверхностей пленок и каналов (при большой поверхностной вязкости):

$$H^\Gamma = \frac{C_b r^4}{\eta R^2} + \frac{C_f h^3}{\eta R}, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость; h – толщина пленок (индексы b и f относятся к каналам

и пленкам); $C_b = 3,6 \cdot 10^{-4}$, $C_f = 8,8 \cdot 10^{-2}$ – гидродинамические коэффициенты, которые определяются геометрическими параметрами каналов и пленок, r – радиус кривизны канала Плато – Гиббса; R – радиус пузырьков. С учетом гидродинамических коэффициентов гидропроводность пены определяется равенством

$$H^\Gamma = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} R^2}{\eta r_b^2} + \frac{2 \cdot 10^{-2} R^2}{\eta n_f^3}. \quad (2)$$

В работе [1] также показано, что гидропроводность пены носит каналовой характер, если выполняется условие: $V_f^3/V_K^2 \ll 1$, где $V_f = 1,64h/R$, $V_K = 0,33r^2/R$. При этом расход жидкости через пену равен

$$Q' = H_K \rho g A, \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения пены.

Учитывая объемную долю жидкости в пене

$$\frac{1}{n} = 0,33 \frac{\bar{R}^2}{r^2},$$

где \bar{R} – средний радиус пузырьков в рамках модели ячейки в виде компактного 14-гранника, получим выражение

$$Q' = 0,33 f \rho g A r^2 / \eta n. \quad (4)$$

Отметим, что уравнение (4) описывает течение дисперсионной среды через пену при выполнении следующих условий: структура пены является полностью полиэдрической; вся жидкость находится в каналах, а содержание жидкости в пленках пренебрежимо мало. Зависимость, подобная уравнению (4), была впервые получена в работе Леонарда и Лемлиха [5] и является аналогом уравнения Пуазейля:

$$v = f \left(\frac{dP}{dl} \right) \cdot \frac{r^2}{\eta}. \quad (5)$$

При течении жидкости под действием силы тяжести линейная скорость определяется зависимостью

$$v = \frac{\rho g f}{\eta \alpha} \cdot r^2, \quad (6)$$

где η – объемная вязкость жидкости. Учитывая влияние поверхностной вязкости (η^s), Нгуйен [6] получил выражение для скорости течения раствора ПАВ по каналу Пла-

то – Гиббса численным решением уравнения Навье – Стокса:

$$\bar{v}_N = \frac{0,16 R^2}{150 \eta} \cdot \rho g (Ng), \quad (7)$$

где параметр Ng определяется формулой

$$Ng = \left[1 + \frac{3,275 \cdot B_0^{-0,5}}{0,209 + B_0^{0,628}} \right]; \quad (8)$$

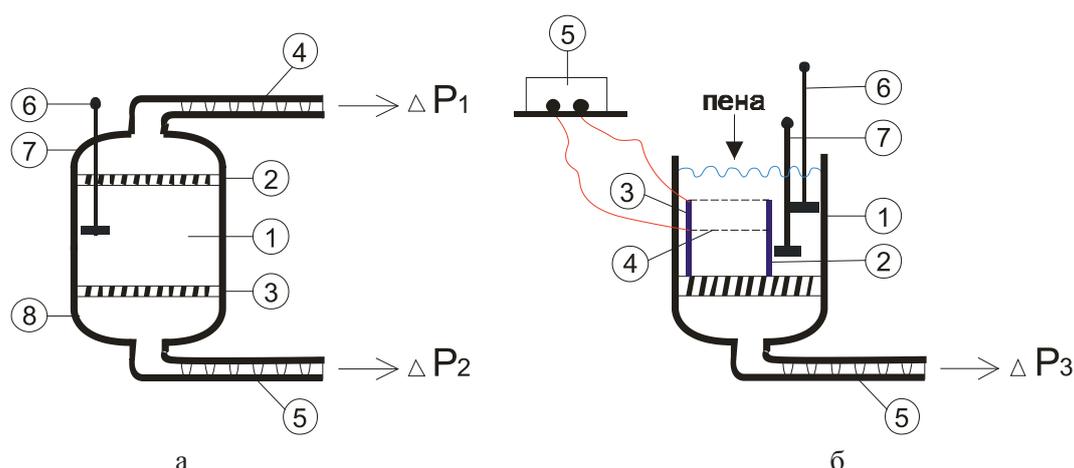
$$B_0 = \frac{\eta^s}{\eta R} - \text{число Буссинеска}. \quad (9)$$

В работах Десаи и Кумара [7–9] используется величина α , ($\alpha = 1/B_0$), которая называется степенью подвижности поверхностей канала. Зависимость $\beta = f(\alpha)$ используется в указанных работах для оценки степени подвижности поверхностей.

Методы исследования

1.1. Исследование течения растворов ПАВ

Метод исследования пен под действием приложенных перепадов давления получил название Foam Pressure Drop Technique (FPDT) [10]. Использование пористых керамических или стеклянных пластин позволяет получать «сухие пены» высокой кратности (1000 и более). Исследование течения дисперсионной среды через пену в гравитационном поле и при больших перепадах давлений ($\Delta P \gg \rho g H$) проводят в ячейках, использованных ранее в работах [11–16] и представленных на рисунке, а, б.



Схемы устройств для исследования течения дисперсионной среды через пену:

- а – 1 – стеклянная ячейка с двумя пористыми фильтрами; 2, 3 – пористые пластины;
4, 5 – градуированные стеклянные трубки; 6 – микроанометр; 7, 8 – раствор пенообразователя;
б – 1 – стеклянная ячейка с пористым фильтром; 2 – стеклянный цилиндр;
3, 4 – электроды; 5 – кондуктометр; 6, 7 – микроанометры;
 ΔP_1 ; ΔP_2 ; ΔP_3 – приложенные к пене перепады давления

Из пеногенератора пена поступает в пеносборник 1 (рисунок, а), ограниченный с двух сторон пористыми перегородками (3, 4). С наружных сторон перегородки находятся в контакте с раствором пенообразователя под одинаковым разряжением ΔP_1 и ΔP_2 . Величина приложенного перепада давления (ΔP) задает радиус каналов Плато – Гиббса:

$$r = \frac{\sigma}{P_\sigma} = \frac{\sigma}{\Delta P + 1,8\sigma/a}, \quad (10)$$

где σ – поверхностное натяжение; P_σ – капиллярное давление в пене. Отметим, что при больших ΔP поправкой на капиллярное давление в пузырьках пренебрегали, так как

$$\Delta P \gg 1,8\sigma/a,$$

где a – дисперсность пены. Объемную скорость раствора (расход) измеряют с помощью градуированных капиллярных трубок (4, 5), когда профиль (изменение радиуса канала по высоте пены) становится равновесным.

Для изучения нестационарного синерезиса пены использовали новый метод с одной пористой пластиной (рисунок, б). Пена помещается в стеклянный стакан (1), дном которого является пористая пластина. На пластину внутри стакана устанавливается стеклянный цилиндр (2) ($d = 20$ мм) с двумя горизонтальными электродами (3, 4), необходимыми для определения кратности. Electroды представляют собой металлические сетки. На уровне верхнего и нижнего электродов фиксируются два микроманометра (6, 7) для измерения давления в пенных каналах. Стеклянный стакан заполняется пеной ($H = 2$ см) перед началом эксперимента, затем под пластиной создается пониженное давление. В течение эксперимента измеряется давление в каналах в нижней и верхней точках пенного столба и электропроводность пены. Важная особенность нового типа метода FPDT с одной пористой пластиной – возможность изучать в каждом эксперименте влияние на скорость синерезиса пены не только радиусов кривизны каналов Плато – Гиббса и объемной доли жидкости, но и градиента давления.

1.2. Измерение капиллярного давления в каналах Плато – Гиббса

Пониженное давление в каналах Плато – Гиббса пены измеряли с помощью капиллярного микроманометра [10]. Микроманометр состоит из тонкого стеклянного капилляра, к нижнему концу которого присоединена

пористая пластинка. Капилляр заполняли раствором пенообразователя, а верхнее отверстие капилляра герметично закрывали. Изменяя соотношение объемов воздуха и жидкости в капилляре, можно получить микроманометр для измерения требуемого диапазона давлений. Радиус капилляра был достаточно малым ($10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-2}$ см), чтобы количество жидкости, вытекающее в пену в результате измерений, было незначительным по сравнению с количеством жидкости в самой пене. Перед началом опыта микроманометр калибровали по образцовому вакуумметру и строили зависимость изменения высоты столбика раствора в капилляре Δh от приложенного перепада давлений ΔP . Величину приложенного давления (до 10^4 Па) измеряли водным U-образным манометром с точностью 0,6%.

Течение дисперсионной среды через пену

В работе [11] в качестве гидродинамической модели пены использовали систему независимых (параллельно соединенных) капилляров, поперечным сечением которых является «сферический» треугольник с постоянным (по длине канала) радиусом кривизны r . Было показано, что скорость течения раствора ПАВ через пену с неизменным по высоте слоя радиусом ($r > 50$ мкм) канала Плато превышала в 2–9 раз рассчитанную в предположении неподвижной поверхности. Течение раствора ПАВ (при изменении радиуса канала Плато от 30 до 100 мкм) проведено в работах [12–15]. Было изучено течение дисперсионной среды через пену, полученную из раствора ионогенного ПАВ – додецилсульфата натрия (DDSDNa) с добавками хлорида натрия или желатины. Отметим, что добавление хлорида натрия в количестве 0,3–0,5 моль/л приводит к формированию в пене черных ньютоновских пленок [10]. Добавление желатины изменяет поверхностную вязкость. Поверхностная вязкость растворов додецилсульфата натрия с добавкой желатины велика и составляет $4,5 \cdot 10^{-6}$ и $5-8 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м [16, 17]. В таблице представлено отношение экспериментально полученной (v_Σ) скорости течения раствора ПАВ по каналу Плато к теоретической (v_T) в предположении неподвижной поверхности, рассчитанной по уравнению Леонарда – Лемлиха и к скорости течения раствора ПАВ (v_N), рассчитанной по формуле (7) с использованием зависимости, предложенной Нгуйеном. Проведено сравнение с теоретической зависимостью $\beta = f(\alpha)$ Десаи, Кумара.

Оценка степени подвижности поверхности канала Плато – Гиббса

Исследуемый раствор пенообразователя	r , мкм	β	v_3/v_N	v_3/v_T
1	2	7	8	9
1 DDSNa + $5 \cdot 10^{-4}\%$ LOH + 0,1 моль/л NaCl	30	1	1,01	1
2 DDSNa + 0,334 моль/л NaCl	30	1	1,25	1
3 DDSNa + 0,5 моль/л NaCl	30	1	1,25	1
4 DDSNa + 0,5 моль/л NaCl	68	1,2	1,7	1,2
5 10^{-2} DDSNa + 0,2% желатины + 0,1 моль/л NaCl	30	1	1	1

Как видно из таблицы, полную неподвижность поверхностей наблюдали в пенах из DDSNa с ньютоновскими черными пленками (растворы 2, 3) и добавками лаурилового спирта и желатины (растворы 1 и 5). Полную неподвижность поверхностей в этом случае предсказывают теории Десаи, Кумара, Нгуйена (параметр β и отношение $v_3/v_N = 1$ для растворов 1 и 5, таблица). В растворах DDSNa с ньютоновскими черными пленками, концентрацией электролита 0,334 моль/дм³ и радиусом канала Плато $r = 30$ мкм полную неподвижность поверхности канала предсказывает зависимость Десаи и Кумара, чему соответствуют экспериментальные данные. Отношение ($v_3/v_T = \beta = 1$); при увеличении радиуса канала до 68 мкм $v_3/v_T = \beta = 1,2$; $v_3/v_N = 1,7$. Отметим, что параметр β предсказывает незначительную (в 1,2–1,4 раза) подвижность поверхностей в пенах из раствора DDSNa с обычными черными пленками и в пенах, полученных из неионогенных ПАВ. Однако экспериментальные значения линейных скоростей течения превышали рассчитанные по уравнению Леонарда – Лемлиха в 2–4 раза [11]. Ускоренное (по сравнению с неподвижной поверхностью) течение жидкости по каналам в пенах из раствора Тритона X-100 и DDSNa с обычными черными пленками, возможно, обусловлено «конвейерным переносом» ПАВ по пленке, контактирующей с каналом Плато [18]. Данный механизм не исключает также вовлечение жидкости, содержащейся в узлах сечения канала в процесс переноса ПАВ. Отношение экспериментальной скорости течения (v_3) к рассчитанной по уравнению Нгуйена (v_N) составляет 2,44 и 1,7 в пенах из растворов Тритона X-100 и DDSNa с обычными черными пленками. В этом случае отношения экспериментальной скорости течения растворов ПАВ к теоретическим значениям, рассчитанным по уравнению Леонарда-Лемлиха, были равны 4,4 и 2,6 соответственно. Отметим, что существуют сложности при использовании уравнения Нгуйена для описания течения растворов

ПАВ через пену с радиусами каналов Плато более 100 мкм. Сохраняющиеся в оценке (с помощью уравнения Нгуйена) степени подвижности поверхностей различия могут быть также обусловлены предположением автора о нулевой скорости течения в узлах треугольного сечения канала Плато. Более того, при радиусах каналов более 100 мкм вклад жидкости, содержащейся в узлах и пленках, становится существенным. Исследование нестационарного синерезиса с использованием ячейки, представленной на рисунке, б, проводили в работе [19]. Было показано, что уравнение Леонарда – Лемлиха позволяет описать течение через пену с ньютоновскими черными пленками и радиусами канала Плато менее 40 мкм, полученную из додецилсульфата натрия.

Перспективным (в том числе для изучения течения через пену, стабилизированную твердыми частицами [20, 21]) является исследование нестационарного синерезиса с использованием ячейки, представленной на рисунке, б [19]. Как было показано ранее [19], данный метод позволяет избежать сложного вычисления скорости течения дисперсионной среды через пену при изменяющемся по высоте радиусе канала Плато. В работе [22] уравнение Леонарда – Лемлиха применено для описания течения дисперсионной среды через пену, стабилизированную органомодифицированными частицами гидроксида алюминия. Экспериментальная скорость течения через такую пену совпадает с рассчитанной по уравнению (4) в предположении неподвижной поверхности.

Заключение

Полная неподвижность поверхности канала наблюдается в пенах, полученных из ионогенного ПАВ додецилсульфата натрия (DDSNa) с ньютоновскими черными пленками при радиусе канала 30 мкм, а также в пене из DDSNa с добавкой желатины и лаурилового спирта. Экспериментальная скорость течения через канал Плато в таких пенах совпадает с предсказанной известными теоретическими зависимостями

и подтверждает режим течения с доминирующими потерями в каналах.

Список литературы

1. Кротов В.В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. Локальная гидропроводимость полимерических дисперсных систем // Коллоид. журн. – 1980. – т. 42. – № 6. – С. 1092–1101.
2. Кротов В.В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. Локальное уравнение синерезиса и постановка краевых условий // Коллоид. журн. – 1981. – т. 43. – № 1. – С. 43–50.
3. Кротов В.В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. Некоторые аналитические решения одномерного уравнения синерезиса // Коллоид. журн. – 1981. – т. 43. – № 2. – С. 286–297.
4. Кротов В.В. Обобщенные уравнения синерезиса // Коллоид. журн. – 1984. – т. 46. – № 1. – С. 15–22.
5. Leonard R.A., Lemlich R. Laminar longitudinal flow between close – paced cylinders // Chem. Eng. Sci. 1965. Vol. 20. № 8. P. 790–791.
6. Nguyen A. Liquid drainage in single Plateau borders of foam // J. Colloid and Interface Science. – 2002. – № 249. – P. 1994–1999.
7. Desai D., Kumar R. Flow through a Plateau Border of cellular foam // Chem. Eng. Sci. – 1982. – Vol. 37. – № 9. – P. 1361–1370.
8. Desai D., Kumar R. Liquid holdup in semibatch cellular foams // Chem. Eng. Sci. – 1983. – Vol. 38. – № 9. – P. 1525–1534.
9. Desai D., Kumar R. Liquid over flow from vertical cocurrent foam columns // Chem. Eng. Sci. – 1984. – Vol. 39. – № 11. – P. 1559–1570.
10. Exerowa D., Kruglyakov P.M. Foam and foam films. Theory, experiment, application. Elsevier. – Amsterdam, 1998. – 773 p.
11. Кузнецова Л.Л., Кругляков П.М. Исследование закономерностей течения растворов ПАВ по каналам Плато–Гиббса пены // ДАН СССР. – 1981. – т. 260. – № 4. – С. 928–932.
12. Фокина Н.Г., Кругляков П.М. Исследование закономерностей течения растворов ПАВ через пену с тонкими каналами Плато–Гиббса при больших перепадах давления // Коллоид. журн. – 1986. – т. 38. – № 2. – С. 318–324.
13. Vilkoва N.G., Kruglyakov P.M. Influence of a liquid flow through a foam under a pressure drop on the Plateau border curvature profile // Mendeleev commun. – 2004. – № 1. – P. 22–29.
14. Kruglyakov P.M., Karakashev S.I., Nguyen A.V., Vilkoва N.G. Foam drainage. // Current opinion in Colloid and Interface Science. – 2008. – Vol. 13. – P. 163–170.
15. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilkoва N.G., Karakashev S. Investigation of foam drainage using foam pressure drop technique // Colloids and surfaces. – 2010. – Vol. 354. – P. 291–297.
16. Измайлова В.Н., Деркач С.Р., Зотова К.В., Данилова Р.Г. Влияние углеводородных и фторосодержащих ПАВ на свойства желатины в объеме водной фазы и на границе с воздухом // Коллоид. журн. – 1993. – т. 55. – № 3. – С. 54–89.
17. Вюстнек Р., Цастров Л., Кречмар Г. Исследование поверхностных свойств адсорбционных слоев желатины с добавками ПАВ на границе раздела фаз воздух–раствор // Коллоид. журн. – 1985. – т. 37. – № 3. – С. 462–470.
18. Перцов А.В., Симонов А.Е., Породенко Е.В. Синерезис в пенах. Компьютерное моделирование // Коллоид. журн. – 1992. – т. 54. – № 11.
19. Кругляков П.М., Еланева С.И., Вилкова Н.Г. Исследование синерезиса в тонких слоях пены с использованием метода создания перепада давления в её жидкой фазе // Коллоидный журнал. – 2010. – № 3. – С. 394–399.
20. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilkoва N.G., Karakashev S.I. About mechanism of foam stabilization by solid particles // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – № 165. – P. 108–116.

21. Vilkoва N.G., Karakashev S.I., Elaneva S.I. Effect of hexilamine concentration on the properties of foams and foam films stabilized by Ludox // Mendeleev commun. 2012. № 22. P. 227–228.

22. Мишина С.И., Вилкова Н.Г. Синерезис пен, стабилизированных органомодифицированными частицами гидроксида алюминия // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. – 2014. – № 10–11 (10). – URL: <http://7universum.com/en/nature/archive/item/1696> (дата обращения: 24.01.2015).

References

1. Krotov V.V. Kolloidnij zhurnal, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 1092–1101.
2. Krotov V.V. Kolloidnij zhurnal, 1981, vol. 43, no. 1, pp. 43–50.
3. Krotov V.V. Kolloidnij zhurnal, 1981, vol. 43, no. 2, pp. 286–297.
4. Krotov V.V. Kolloidnij zhurnal, 1984, vol. 46, no. 1, pp. 15–22.
5. Leonard R.A., Lemlich R. Chem. Eng. Sci. 1965. Vol. 20. no. 8. P. 790–791.
6. Nguyen A. J. Colloid and Interface Science. 2002. no. 249. pp. 1994–1999.
7. Desai D., Kumar R. Chem. Eng. Sci. 1982. Vol. 37. no. 9. pp. 1361–1370.
8. Desai D., Kumar R. Chem. Eng. Sci. 1983. Vol. 38. no. 9. pp. 1525–1534.
9. Desai D., Kumar R. Chem. Eng. Sci. 1984. Vol. 39. no. 11. pp. 1559–1570.
10. Exerowa D., Kruglyakov P.M. Foam and foam films. Theory, experiment, application. Elsevier. Amsterdam, 1998. 773 p.
11. Kuznetsova L.L., Kruglyakov P.M. DAN SSSR, 1981, vol. 260, no. 4, pp. 928–932.
12. Fokina N.G., Kruglyakov P.M. Kolloidnij zhurnal, 1986, vol. 38, no. 2, pp. 318–324.
13. Vilkoва N.G., Kruglyakov P.M. Mendeleev commun. 2004. no. 1. pp. 22–29.
14. Kruglyakov P.M., Karakashev S.I., Nguyen A.V., Vilkoва N.G. Current opinion in Colloid and Interface Science. Vol. 13. 2008. pp. 163–170.
15. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilkoва N.G., Karakashev S. Colloids and surfaces. 2010. Vol. 354. pp. 291–297.
16. Izmaylova V.N., Derkach S.R., Zotova K.V., Danilova R.G. Kolloidnij zhurnal, 1993, vol. 55, no. 3, pp. 54–89.
17. Vustnek R., Tsastrov L., Krechmar G. Kolloidnij zhurnal, 1985, vol. 37, no. 3, pp. 462–470.
18. Pertsov A.V., Simonov A.E., Porodenko E.V. Kolloidnij zhurnal, 1992, vol. 54, no. 11, pp. 462–470.
19. Kruglyakov P.M., Vilkoва N.G., Elaneva S.I. Kolloidnij zhurnal, 2010, no. 3, pp. 394–399.
20. Kruglyakov P.M., Elaneva S.I., Vilkoва N.G., Karakashev S.I. Advances in Colloid and Interface Science. 2011. no. 165. pp. 108–116.
21. Vilkoва N.G., Karakashev S.I., Elaneva S.I. // Mendeleev commun. 2012. no. 22. pp. 227–228.
22. Mishina S.I., Vilkoва N.G. Universum: himiya i biologiya: elektronnyy nauchnyy zhurnal 2014. no. 10–11 (Universum: chemistry and biology: journal of computer). <http://7universum.com/en/nature/archive/item/1696>.

Рецензенты:

Кошев А.Н., д.х.н., профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза;

Фокин Г.А., д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 18.03.2015.