

УДК 544.773.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПЕН**

*Г.А. Туманов, А.В. Старовойтов, Е.И. Лагусева,  
К.В. Чалов, Н.Ю. Старовойтова, В.Ю. Долуда  
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И.,  
Чалов К.В., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю., 2024

**Аннотация.** В статье рассмотрены практические и теоретические вопросы определения времени оседания пен для пожаротушащих растворов. Исследованы водные пенообразующие растворы, содержащие 1–2 мас.% децилсульфата натрия, 0,5–2 мас.% сульфозтаксилата натрия, 0,1–0,5 мас.% бутанола, 0,1–0,5 мас.% лигносульфаната технического. Определение времени оседания пены производилось по времени оседания 50 % столба пены. Для этого в мерный цилиндр наливалось 20 мл приготовленного пенообразующего раствора, после чего через него в течение 3 мин продувался воздух с расходом 50, 100, 150, 200 мл/мин. Найдена зависимость времени оседания половины столба пены от комплекса  $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$ , которая описывается степенной функцией  $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\tau_0 / (g\rho))^{-0,211}$  с достоверностью аппроксимации 95 %. Сделан вывод, что обеспечение приемлемой устойчивости пены возможно для значений комплекса  $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$  не более  $10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$ .

**Ключевые слова:** устойчивость, пена, время оседания пены, стабильность, скорость оседания пены.

**DOI:** 10.46573/2658-7459-2024-3-95-100

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время пены нашли широкое применение в различных областях экономики, техники, народного хозяйства [1]. Стабильные пены позволяют получать качественные пенобетонные строительные и пенонаполненные теплоизоляционные материалы, противопожарные пены, муссы и суфле, а также пористые медицинские материалы и сорбенты [1–6]. При этом вопросы определения устойчивости пен остаются актуальными, так как их стабильность является одним из основополагающих показателей обеспечения качества вышеуказанных изделий и продуктов. Таким образом, изучение вопросов определения устойчивости пен – это актуальная задача современной химии и химической технологии.

На устойчивость пен основное влияние оказывает равновесие между разницей давления внутри и вне ячейки пены и поверхностным натяжением (рис. 1), стремящимся уменьшить площадь поверхности ячейки пены.

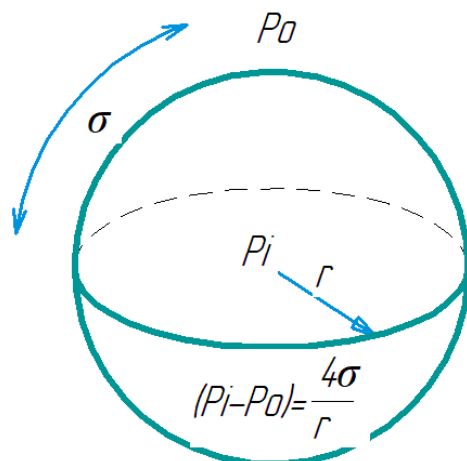


Рис. 1. Модель пузырька пены и основных сил, действующих на него

Изменение давления в пузырьке может быть рассчитано по закону Юнга – Лапласа  $\Delta P = 4\sigma/r$ , где  $\Delta P$  – разница давления внутри и снаружи пузырька;  $\sigma$  – поверхностное натяжение на поверхности раздела фаз, Н/м;  $r$  – радиус пузырька, м. При этом поверхностное натяжение стремится минимизировать размеры пузырька, а внутреннее давление противостоит этому процессу. На устойчивость пузырьков пены влияет целый спектр внешних условий, таких как количество поверхностно-активного вещества, число стабилизирующих добавок, температура и т.п. Применяя закон Пуазеля, возможно получить уравнение, удовлетворительно описывающее время схлопывания отдельного пузырька пены [7] при начальных значениях толщин пленки:

$$t = 17,92 \frac{\mu r_0}{g\rho} \left[ \frac{1}{\delta_f^2} - \frac{1}{\delta_i^2} \right], \quad (1)$$

где  $\mu$  – вязкость жидкой фазы пены, Па · с;  $r_0$  – исходный радиус пузырька пены, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность жидкой фазы пены, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_f$  – конечная толщина пленки пены, м;  $\delta_i$  – начальная толщина пленки пены, м;

В случае использования вышеуказанного уравнения для реальной пены возможно привести его к виду

$$t = k \frac{\mu r_0}{g\rho}, \quad (2)$$

где  $k$  – эффективная константа оседания пены, 1/м<sup>2</sup>.

В более общем виде можно выразить зависимость в виде уравнения

$$t = f\left(\frac{\mu r_0}{g\rho}\right). \quad (3)$$

Для определения константы оседания пены необходимо построить график зависимости времени оседания пены от симплекса  $\frac{\mu r_0}{g\rho}$  и установить практически время оседания пены. При этом вместо радиуса конкретного пузырька можно использовать средний радиус пузырьков, который может быть определен фотографическим методом для каждого конкретного случая. Варьирование среднего радиуса пузырьков пены возможно за

счет изменения интенсивности подачи пенообразующего агента. Кроме того, изменяя количество добавляемого в воду пенообразователя, можно изменять вязкость и плотность пенообразующего раствора. При этом меняется время оседания пены.

### МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения экспериментов по изучению устойчивости пены были подготовлены пенообразующие растворы. Определение времени оседания пены производилось с использованием установки (рис. 2), при этом находилось время оседания 50 % столба пены. В мерный цилиндр наливалось 20 мл приготовленного пенообразующего раствора, после чего через него в течение 3 мин продувался воздух с расходом 50, 100, 150, 200 мл/мин. Измерение времени оседания для каждого характеристического значения  $\frac{\mu\tau_0}{\rho r}$  производилось до получения трех последовательно сходящихся значений при температуре 20 °С. Средний диаметр пузырьков определялся по изображению столба пены после фотографирования. При этом использовалась программа Scion Image.

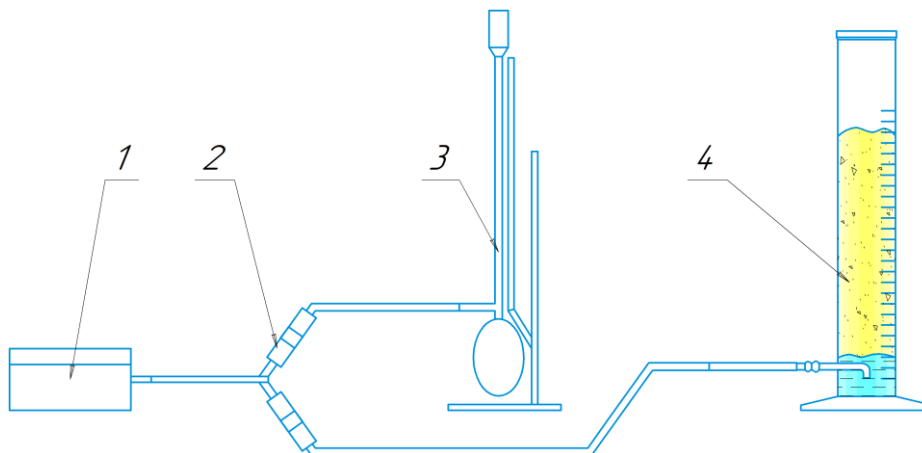


Рис. 2. Установка для изучения времени оседания пены:

1 – микрокомпрессор; 2 – регулирующие подачу воздуха зажимы;  
3 – мыльно-пенный расходомер; 4 – мерный цилиндр с внутренней трубкой

Были получены пенообразующие растворы, содержащие следующие компоненты: 1–2 мас.% децилсульфата натрия; 0,5–2 мас.% сульфозтаксилата натрия; 0,1–0,5 мас.% бутанола; 0,1–0,5 мас.% лигносульфаната технического. Оставшуюся часть составляла вода.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате проведенной экспериментальной работы был получен график зависимости времени оседания 50 % столба пены от симплекса  $\frac{\mu\tau_0}{\rho r}$  (рис. 3).

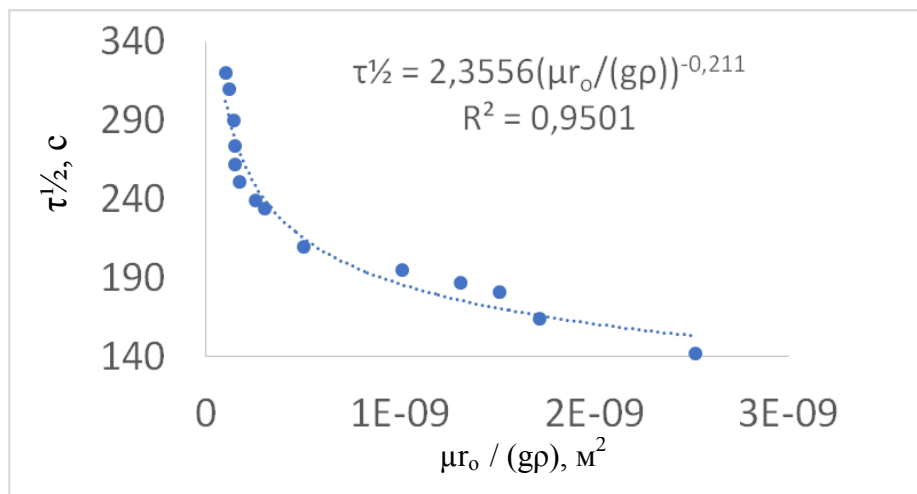


Рис. 3. Зависимость времени оседания  
половины столба пены от симплекса  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$

Полученная зависимость может быть описана степенной функцией  $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\gamma_0 / (gr))^{-0,211}$ , достоверность аппроксимации при этом составляет 95 %. Общий вид функции обусловлен видом уравнения (1), где зависимость квадрата толщины пленки пены имеет гиперболический характер. При этом толщина пленки пены для конкретных приготовленных растворов существенно зависит от радиуса пузырька пены. Время оседания пены существенно уменьшается с 300 до 200 с при увеличении значений комплекса  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$  с  $10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$ . После этого время оседания пены изменяется не столь большими темпами и уменьшается до значений 140 с при увеличении значений комплекса  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$  до  $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$ . Таким образом, для получения максимальной устойчивости пены можно использовать пенообразующие растворы и условия пенообразования, обеспечивающие комплекс  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$  больше  $10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены эксперименты по определению устойчивости образцов пены для растворов, содержащих децилсульфат натрия, сульфэтаксилат натрия, бутанол, лигносульфанат. Выявили зависимость времени оседания половины столба пены от комплекса  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$ , которая выражается функцией  $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\gamma_0 / (gr))^{-0,211}$  с достоверностью аппроксимации 95 %. Установили, что обеспечение приемлемой устойчивости пены для растворов пенообразователя со значениями функции  $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$  не более  $10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$  может быть получено путем подбора состава растворов с требуемыми диапазонами вязкостей и плотностей.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Chickpea Aquafaba Production Techniques for Foaming: A Comparison of Foam Stability Considering the Use of Soaking Water, Additives, Pressure Cooking Time, pH, and Protein Content / L.T. Lima [et al.] // *LWT. Academic Press*. 2024. Vol. 207. P. 116643.
2. The effects of ACR/MAH ionic cross-linking on the cell morphology, mechanical properties, and dimensional stability of PVC foams / J. Guo [et al.] // *Polym Degrad Stab*. 2024. Vol. 229. P. 124–148.
3. Effect of Cold-cap-bottom Shear Stress on Primary Foam Stability / P. Hrma [et al.] // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2024. Vol. 646. P. 123262.
4. Experimental study of foam stability and interfacial behaviour of cellulose nanocrystals-enhanced C22-tailed zwitterionic betaine surfactant / Y. Li [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 414. P. 62–84.
5. Experimental investigation on the stability and heat transfer enhancement of phase change materials composited with nanoparticles and metal foams / B. Yang [et al.] // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 89. P. 683–704.
6. Synergistic Enhancement of Foam Stability by Nanocellulose and Hydrocarbon Surfactants / Q. Li [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2024. Vol. 299. P. 321–336.
7. Shearer L.T., Akers W.W. Foam Stability // *Journal of Physical Chemistry. American Chemical Society*. 1958. Vol. 62. No. 10. P. 1264–1268.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**ТУМАНОВ Григорий Алексеевич** – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

**СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович** – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

**ЛАГУСЕВА Елена Ивановна** – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lagusseva@yandex.ru

**ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tschalov\_k@mail.ru

**СТАРОВОЙТОВА Наталья Юрьевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: starovoytovanu@gmail.com

**ДОЛУДА Валентин Юрьевич** – доктор химических наук, заведующий кафедрой химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И., Чалов К.В., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю. Экспериментальное определение устойчивости пен // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 95–100.

**EXPERIMENTAL STUDY OF FOAM STABILITY**

**G.A. Tumanov, A.V. Starovoitov, E.I. Laguseva,  
K.V. Chalov, N.Yu. Starovoitova, V.Yu. Doluda**  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** In the article practical and theoretical issues of determining the settling time of foams for fire extinguishing solutions are considered. Aqueous foam-forming solutions containing 1–2 wt.% sodium decylsulfate, 0,5–2 wt.% sodium sulfoethoxylate, 0,1–0,5 wt.% butanol, 0,1–0,5 wt.% lignosulfonate technical were investigated. The foam settling time was determined by the settling time of 50 % of the foam column. For this purpose 20 ml of the prepared foam-forming solution was poured into a measuring cylinder, after which air was blown through it for 3 min at a flow rate of 50, 100, 150, 200 ml/min. The dependence of the settling time of half of the foam column on the complex  $\frac{\mu r_0}{g\rho}$ , which is described by the steppe function  $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu r_0 / (g\rho))^{-0,211}$  with an approximation reliability of 95 %, was found. It is concluded that the provision of acceptable foam stability is possible for values of the complex  $\frac{\mu r_0}{g\rho}$  not more than  $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ .

**Keywords:** stability, foam, foam settling time, stability, foam settling velocity.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*TUMANOV Grigory Alekseevich* – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

*STAROVOITOV Anatoly Vladimirovich* – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

*LAGUSEVA Elena Ivanovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lagusseva@yandex.ru

*CHALOV Kirill Vyacheslavovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tschalov\_k@mail.ru

*STAROVOITOVA Natalya Yuryevna* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: starovoytovanu@gmail.com

*DOLUDA Valentin Yuryevich* – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Tumanov G.A., Starovoitov A.V., Laguseva E.I., Chalov K.V., Starovoitova N.Yu., Doluda V.Yu. Experimental study of foam stability // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 95–100.