

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕН ОГNETУШАЩИХ РАСТВОРОВ

Г.А. Туманов, К.В. Туманова, В.Ю. Долуда

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

При разработке пенообразователей для пожаротушения исследователи постоянно сталкиваются с проблемой отсутствия обобщенной научной базы, характеризующей ключевые показатели эффективности образуемой пены. В качестве отправной точки для последующих изысканий может быть принята концепция сухой пены. В данной статье приведено уравнение состояния пены, а также продемонстрирована возможность расчета термодинамических характеристик для противопожарных пен с использованием свободной энергии Гиббса.

Ключевые слова: пены, пожаротушение, уравнение состояния, энергия Гиббса

Пены на сегодняшний день нашли широкое применение в различных отраслях экономики включая пищевую промышленность, производство строительных материалов, химической промышленности и производстве средств пожаротушения [1–6]. Огнетушащие противопожарные пены, на сегодняшний день, нашли широкое применение, для тушения нефти, нефтепродуктов, химически активных соединений, а также для ускорения времени тушения традиционных пожаров [7–10]. При этом основными показателями эффективности пожаротушающих пен являются устойчивость пены, кратность, время тушения н-гептана (ГОСТ Р50588-2012), при этом все эти показатели определяются эмпирически, и, зачастую, не имеют теоретической базы. В связи с чем теоретическое обоснование вопросов формирования, поддержания стабильности и направленной деградации пен является важной научно-технической задачей, требующей всестороннего внимания и изучения.

Уравнение состояния пены и свободная энергия Гиббса

Теория образования жидких пен базируется на концепции сухой пены, как отправной точки для всех последующих теоретических положений [11]. При этом уравнение состояния для трехмерной пены будет иметь вид (1) [12]:

$$p_{\text{внеш}}V + \frac{2}{3}\sigma A = NT \quad (1)$$

где $p_{\text{внеш}}$ – внешнее давление (Па), V – общий объем пены (м^3), T – температура (К), σ – поверхностное натяжение пены (Н/м), A – общая

площадь поверхности пены (m^2), N – число молекул газа, входящего в состав пены.

В случае двухмерной пены уравнение 1 принимает вид уравнения 2. При этом происходит изменение коэффициента $2/3$ на $1/2$ в связи с изменением A – с площади поверхности (m^2), на общий периметр поверхности пузырьков пены (m) и V – с общего объема пены (m^3), на общую площадь поверхности (m^2) [12].

$$p_{\text{внеш}}V + \frac{1}{2}\sigma A = NT \quad (2)$$

При этом свободная энергия Гиббса может быть выражена уравнением (3) [12].

$$G_{\text{пены}} = G_{\text{газа}} + \sigma A \quad (3)$$

Где $G_{\text{газа}}$ – свободная энергия Гиббса (кДж),

В случае использования методов статистической термодинамики для приближения идеального газа возможно получить значения свободной энергии Гиббса для газа [13] по формуле (4):

$$G_{\text{газа}} = T \sum_{\alpha=1}^M N_{\alpha} \log(p_{\alpha}) \quad (4)$$

где M – число отдельных структурных элементов пены (пузырьков), p_{α} – давление внутри пузырьков пены (Па), N_{α} – число молекул газа внутри пузырьков пены

В дифференциальном виде уравнение для расчёта изменения свободной энергии Гиббса [14] имеет следующий вид (5):

$$dG = -Sd(T) + \sum V_i d(p_i) + \sigma d(A) \quad (5)$$

Таким образом, определение направления самопроизвольного процесса образования и деструкции пен возможно с использованием свободной энергии Гиббса.

Методика определения поверхностного натяжения огнетушащих пенообразователей

Определение поверхностного натяжения пенообразующих растворов производилось по ГОСТ Р50588-2012 методом «отрыва кольца (метод Де-Нуи). Рукояткой подъемного механизма или автоматически платформу тензиометра K20 (KRUSS) поднимают таким образом, чтобы измерительное кольцо погрузилось в раствор и находилось на 1 мм ниже поверхности. На панели управления тензиометра обнуляют весовую систему, а затем осуществляют запуск начала измерения поверхностного натяжения. Измерения заканчиваются автоматически. На панели управления тензиометром определяется среднее значение поверхностного натяжения.

Результаты и обсуждение

При расчете изменения свободной энергии Гиббса была рассмотрена возможность образования пены с монодисперсным распределением пузырьков по размерам для $1 m^3$ используемого воздуха, со средним диаметром пузырьков пены 1 мм, 2 мм, 4 мм и 8 мм (Рисунок

1). При расчетах использовалось среднее значение поверхностного натяжения огнетушащих растворов, определенное по ГОСТ Р50588-2012 и равное 26.2 мН/м

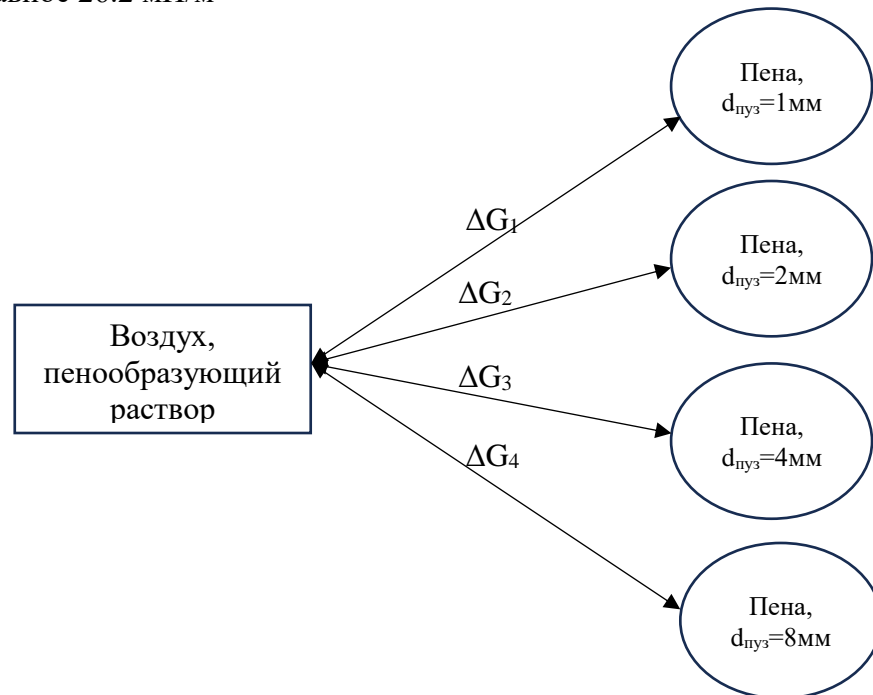


Рис. 1. Расчетная диаграмма определения изменения свободной энергии Гиббса при образовании противопожарной пены

Результаты проведенных расчетов свободной энергии Гиббса для процесса получения пены представлены на рис 2.

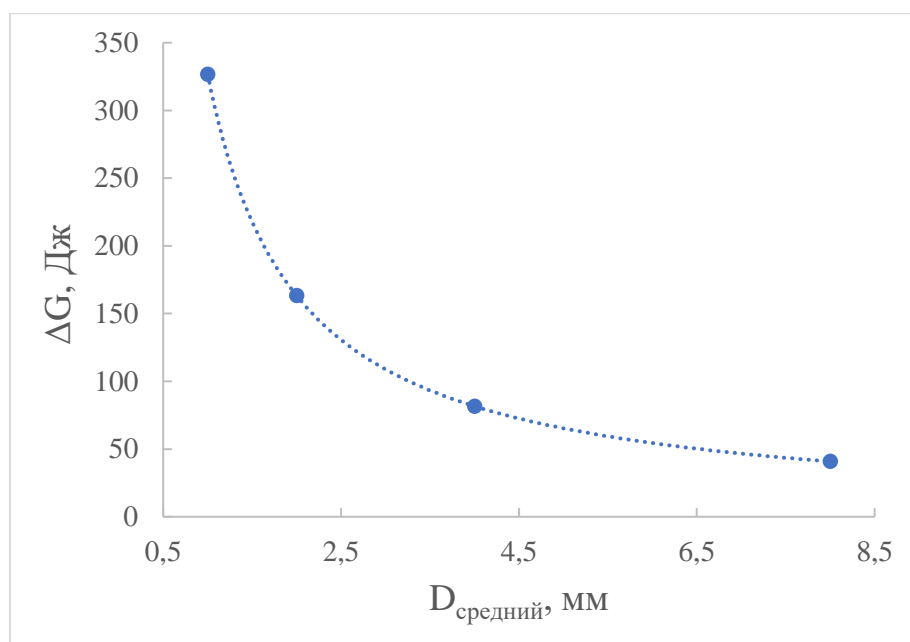


Рис. 2. Зависимость изменения свободной энергии Гиббса при образовании пузырьков противопожарной пены ($p=101325$ Па, $T=293$ К)

Все полученные значения свободной энергии Гиббса для пен с ячейками разного диаметра находятся в положительной области, что говорит о сдвиге равновесия в сторону деструкции пены и образованию исходной двухфазной системы типа жидкость-газ. Максимальным значением энергии Гиббса в 326 Дж характеризовалась пена с диаметром ячеек в 1 мм, увеличение диаметра ячеек до 8 мм приводит к уменьшению значений свободной энергии Гиббса до 41 Дж. Уменьшение значений свободной энергии Гиббса для пены с крупными ячейками свидетельствует о преобладающей термодинамической возможности образования сравнительно крупных ячеек пены.

Заключение

Проведенное исследование показало возможность расчета термодинамических характеристик для противопожарных пен. При расчете изменения свободной энергии Гиббса была рассмотрена возможность образования пены с монодисперсным распределением пузырьков по размерам для 1 м³ используемого воздуха, со средним диаметром пузырьков пены 1 мм, 2 мм, 4 мм и 8 мм. Максимальным значением свободной энергии Гиббса в 326 Дж характеризовалась пена с диаметром ячеек в 1 мм, увеличение диаметра ячеек до 8 мм приводит к уменьшению значений свободной энергии Гиббса до 41 Дж, что свидетельствует о преобладании образования крупноячейистой пены.

Список литературы

1. Wang Z. et al. Effects of the surfactant, polymer, and crude oil properties on the formation and stabilization of oil-based foam liquid films: Insights from the microscale // *Journal of Molecular Liquids*. Elsevier B.V. 2023. V. 373. 121194.
2. Li J. et al. Influence of selected gums on the foaming properties of egg white powders: Kinetics of foam formation and baking performance // *Food Hydrocolloids*. Elsevier B.V. 2023. V. 139. 108529.
3. Vijayaraghavan K., Nikolov A., Wasan D. Foam formation and mitigation in a three-phase gas-liquid-particulate system // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006. V. 123–126, № SPEC. ISS. P. 49–61.
4. Fameau A.L. et al. Liquid foams as sensors for the detection of biomarkers // *Journal of Colloid and Interface Science*. Academic Press Inc., 2023. V. 651. P. 987–991.
5. Kim D.K., Ananth R. Spontaneous aqueous foaming with fluorosurfactants from a hydrocarbon liquid at ambient conditions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier B.V., 2023. V. 663. 131048.
6. Somoza A. et al. Experimental evaluation of foams stabilized by ionic liquids for enhanced oil recovery // *Journal of CO2 Utilization*. Elsevier Ltd, 2023. V. 72. 102507.
7. Wendong K. et al. Preparation of fluorine-free foam extinguishing agent based on silicone and hydrocarbon surfactants for markedly suppressing the pool fire // *Thermal Science and Engineering Progress*. Elsevier Ltd, 2023. V. 40. 101761.
8. Lou M. et al. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // *Results in Engineering*. Elsevier B.V., 2023. V. 17.100874.
9. Chen T. et al. Research on suppression effect of low-expansion AFFF, AFFF/AR and FFFP foam on hot oil fire for oil-immersed transformers // *Thermal Science and Engineering Progress*. Elsevier Ltd, 2023. V. 43. 101991.
10. Qiu K. et al. Tuning rheology and fire-fighting performance of protein-stabilized foam by actively switching the interfacial state of the liquid film // *Journal of Materials Science & Technology*. 2023. V.178. P.120-132.
11. Weaire D., Hutzler S. *The physics of foams* / Clarendon Press. Clarendon. 1999. 246 p.
12. Aref H., Vainchtein D.L. The equation of state of a foam // *Physics of Fluids*. AIP Publishing, 2000. V. 12, № 1. P. 23–28.
13. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical Physics. Part 1* // *Course of Theoretical Physics*. 1976. V. 5. 544 p.
14. Hollinger H.B. Thermodynamics of foam // *Journal of Colloid and Interface Science*. Academic Press, 1991. V. 143, № 1. P. 278–286.

Об авторах:

ТУМАНОВ Григорий Алексеевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22); e-mail: grishatumanoff@yandex.ru.

ТУМАНОВА Ксения Валерьевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22); e-mail: yakubenok98@inbox.ru.

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22); e-mail: doludav@yandex.ru.

**PHYSICOCHEMICAL SUBSTANTIATION OF FIRE
EXTINGUISHING SOLUTION FOAM FORMATION**

G.A. Tumanov, K.V. Tumanova, V.Yu. Doluda

Tver State Technical University, Tver

In the development of firefighting foams, researchers are constantly faced with the problem of the lack of a generalized scientific basis characterizing the key performance indicators of the foam formed. The concept of dry foam can be taken as a starting point for further research. This paper presents the equation of state of foam and demonstrates the possibility of calculating thermodynamic characteristics for firefighting foams using Gibbs free energy.

Keywords: foam, firefighting, equation of state, Gibbs energy.

Дата поступления в редакцию: 25.04.2024.

Дата принятия в печать: 02.05.2024.