

МОДЕЛЬ ТУШЕНИЯ Н-ГЕПТАНА ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ПЕНОЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАЗМЕРНОСТИ

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

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

Математическое моделирование является неотъемлемой частью современной физической-химии. Оно позволяет анализировать сложные физико-химические процессы, предсказывать их результаты и оптимизировать соответствующую систему. Одной из таких систем является процесс тушения органических жидкостей пенами, который включает в себя широкий спектр параметров и факторов, влияющих на его эффективность. В связи с чем определение корреляции времени тушения и состава огнетушащего раствора пены являются актуальной задачей современной физической-химии. В данной статье приведено исследование возможности определения корреляции между временем тушения стандартного возгорания и физико-химическими характеристиками пенообразующего раствора с использованием положений теории размерности. Предварительно была проведена серия экспериментов по определению физико-химических свойств пенообразующих растворов. Определено влияние физико-химических свойств на время тушения. Составлено уравнение модели. Полученная зависимость демонстрирует достаточную сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пенообразующие растворы, пожаротушение, математическая модель, теория размерности.

Определение физико-химических свойств пенообразующих растворов, содержащих добавку лигносульфоната натрия

Для определения физико-химических свойств были получены пенообразующие растворы в состав которых входили: децилсульфат натрия, сульфозтоксилат натрия, бутанол, лигносульфонат натрия и вода. Содержание децилсульфата натрия составляло 0.84 мас.%, сульфозтоксилата натрия – 0.108 мас.%, бутанола – 0.324 мас.%, лигносульфоната натрия – в диапазоне 0.05-0.15 мас.%, оставшуюся часть составляла вода.

Состав раствора менялся введением различных концентраций лигносульфоната натрия начиная с 0.05 мас.% и заканчивая 0.15 мас.% с шагом 0.01%. С ростом содержания лигносульфоната натрия наблюдались изменения плотности и вязкости в растворе.

Определение плотности растворов проводилось по ГОСТ 18995.1-73, определение динамической вязкости растворов проводилось по ГОСТ

1929-87, поверхностное натяжение определялось по ГОСТ 50588-2012, теплоемкость полученных растворов определялась по ГОСТ 23250-78, определение времени тушения н-гептана проводилось по ГОСТ 50588-2012.

Все измерения, включающие определение вязкости и плотности, а также тушение н-гептана, проводились при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Температура пены и н-гептана в момент начала испытаний составляла 20°C .

Вязкость и плотность пенообразующих растворов являются основополагающими параметрами, обеспечивающими хорошее растекание растворов по поверхности очага возгорания в связи с чем определение их оптимальной области является важной задачей разработки эффективных пенообразующих растворов. Зависимость времени тушения пламени н-гептана пенообразующим раствором, содержащего технический лигносульфонат, от плотности и от кинематической вязкости, значения которой были получены расчетным методом, приведена на рисунке 1.

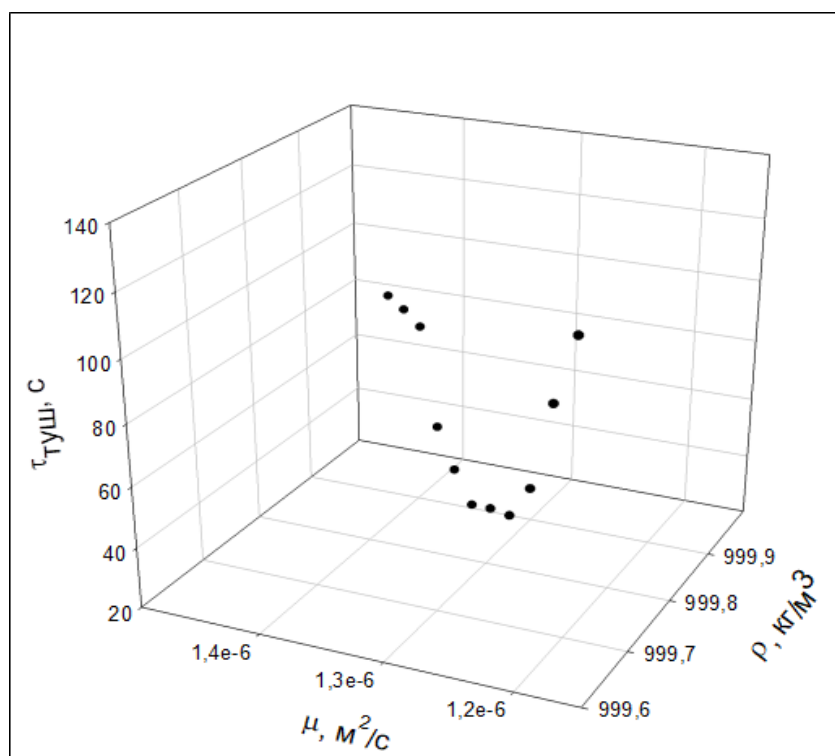


Рис. 1. Зависимость времени тушения пламени н-гептана от плотности и вязкости пенообразующего раствора содержащего лигносульфонат натрия (определение по ГОСТ 50588-2012)

Увеличение вязкости с $1,2 \text{ мкм}^2/\text{с}$ до $1,3 \text{ мкм}^2/\text{с}$ способствует

уменьшению времени тушения пламени н-гептана со 120 до 39 с. Дальнейшее увеличение вязкости пенообразующего раствора до $1,4 \text{ мкм}^2/\text{с}$ приводит к увеличению времени тушения пламени н-гептана до 84 с. Вклад изменения плотности в огнетушащую эффективность состава сравнительно мал, что будет подтверждено ниже при составлении зависимости на основе теории размерности.

Поверхностное натяжение и теплоемкость пенообразующего раствора также являются важными параметрами, обеспечивающими стабильность образующейся пены и эффективность удаления тепла с горячей поверхности н-гептана, в связи с чем определение их оптимальной области является важной составляющей создания эффективных пенообразующих растворов (Рисунок 2).

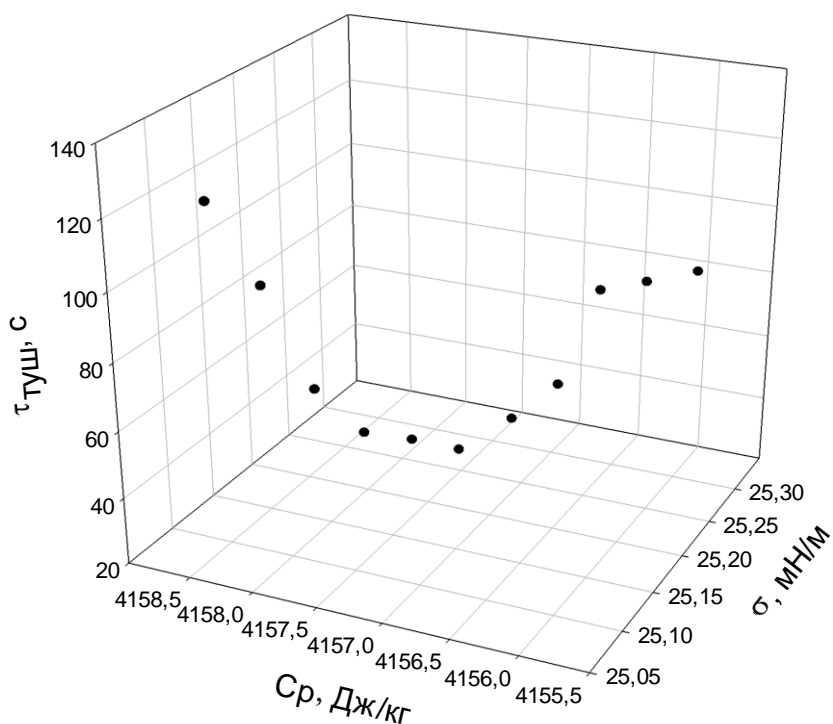


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени н-гептана от поверхностного натяжения и теплоемкости раствора для пенообразующих растворов содержащих лигносульфонат натрия

Так увеличение теплоемкости раствора пенообразователя с 4155 Дж/кг до 4158 Дж/кг способствует уменьшению времени тушения пламени н-гептана со 120 с до 39 с. Дальнейшее же увеличение теплоемкости пенообразующего раствора до 4158 Дж/кг приводит к увеличению времени тушения н-гептана до 120с. Увеличение поверхностного натяжения с 25.1 мН/м до 25.2 мН/м способствует

уменьшению времени тушения со 120 с до 39 с. Последующее увеличение поверхностного натяжения пенообразующего раствора до 25.3 мН/м приводит к увеличению времени тушения пламени н-гептана до 84 с.

При выражении зависимости в координатах: время тушения, поверхностное натяжение и плотность общий вид кривой имеет сходную структуру (Рисунок 3) с предыдущими графиками. Так увеличение поверхностного натяжения с 25.1 мН/м до 25.2 мН/м способствует уменьшению времени тушения пламени н-гептана со 120 с до 39 с. Дальнейшее же увеличение поверхностного натяжения пенообразующего раствора до 25.3 мН/м приводит к увеличению времени тушения н-гептана до 84.

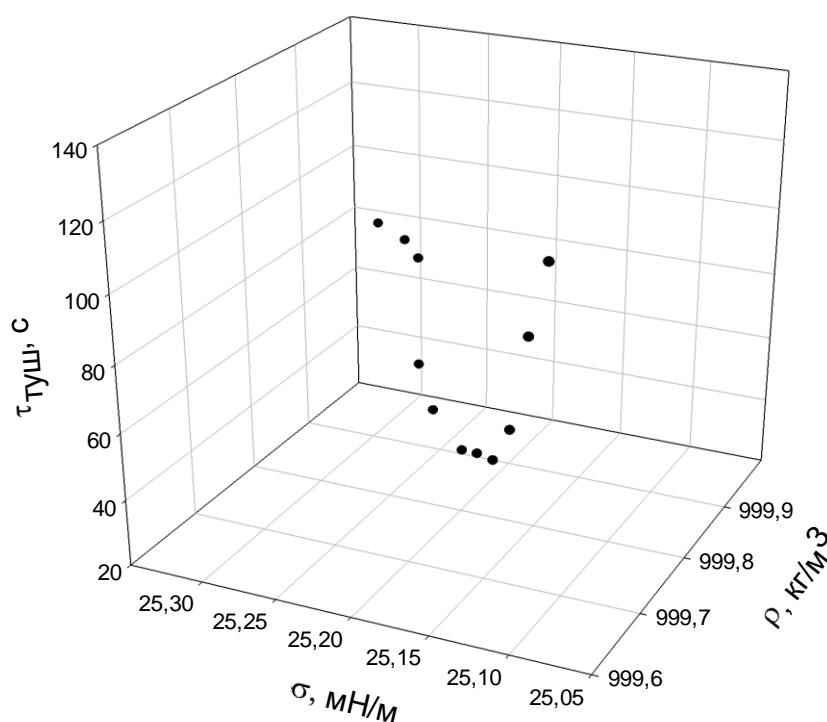


Рис. 3. Зависимость времени тушения пламени н-гептана от поверхностного натяжения и плотности раствора для пенообразующих растворов содержащих лигносульфонат натрия

Модель на основе теории размерности

Теория размерности помогает найти корреляционную взаимосвязь между физико-химическими процессами происходящими в сложных физико-химических системах [1-3]. Зависимость времени тушения горючего может быть выражена функциональной зависимостью (1).

$$\tau_{\text{туш}} = kV_{\text{пены}}^a S_{\text{воз}}^b \sigma_{\text{пены}}^c \mu_{\text{пены}}^d \rho_{\text{пены}}^e C_{\text{пены}}^f \quad (1)$$

Где: k – константа пропорциональности;
 V – удельный объемный расход пены, $[\text{м}^3(\text{пены})/\text{м}^2\text{с}]$;
 S – площадь поверхности горения, $[\text{м}^2]$;
 σ – поверхностное натяжение пенообразующего раствора, $[\text{Н}/\text{м}; \text{кг}/\text{с}^2]$;
 μ – динамическая вязкость пенообразующего раствора, $[\text{Па}\cdot\text{с}; \text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})]$;
 ρ – плотность пены, $[\text{кг}/\text{м}^3]$;
 C – теплоемкость пены, $[\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); (\text{кг}\cdot\text{м}^2)/\text{с}^2]$;
 a, b, c, d, e, f – степенные показатели.

В системе единиц М L T вышеуказанная зависимость будет выглядеть в соответствии с уравнением (2).

$$[T] = V \left[\frac{L}{T} \right]^a S [L^2]^b \left[\frac{M}{T^2} \right]^c \left[\frac{M}{L\cdot T} \right]^d \left[\frac{M}{L^3} \right]^e \left[\frac{M}{L\cdot T} \right]^f \quad (2)$$

Где $[M]$ – единицы измерения массы, кг;
 $[L]$ – единицы измерения геометрических размеров, м;
 $[T]$ – единицы измерения времени, с.
 Сравним показатели степеней в обеих частях равенства (уравнения 3-5).

$$\text{При } M^0 = c+d+e+f(3)$$

$$\text{При } L^0 = a+2b-d-3e-f(4)$$

$$\text{При } T^{-1} = -a-2c-d-f(5)$$

Получаем три уравнения с шестью неизвестными из которых любые три величины можно выразить через три остальные. Выразим степенные указатели a, b, c через d, e, f (6, 7, 8).

$$a=f+2d+2e-1(6)$$

$$b=0.5-0.5d+0.5e(7)$$

$$c=-d-e-f(8)$$

Подставляя значения a, b, c в уравнение 1, получаем уравнение 9.

$$\tau_{\text{туш}} = kV_{\text{пены}}^{f+2d+2e-1} S_{\text{воз}}^{0.5-0.5d+0.5e} \sigma_{\text{пены}}^{-d-e-f} \mu_{\text{пены}}^d \rho_{\text{пены}}^e C_{\text{пены}}^f \quad (9)$$

После преобразования формула 9 приводится к виду (10). Таким образом исходная неизвестная зависимость (1) с шестью неизвестными может быть сведена к зависимости с тремя неизвестными степенями (10).

$$\tau_{\text{туш}} = \frac{kS^{0.5}}{V} \left(\frac{\mu V^2}{S^{0.5}\sigma} \right)^d \left(\frac{\rho V^2 S^{0.5}}{\sigma} \right)^e \left(\frac{C_{\text{пены}} V}{\sigma} \right)^f \quad (10)$$

Определение коэффициента пропорциональности и степенных показателей уравнения 10 проведено по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Полученная зависимость представлена на рисунке 4 и показывает высокую сходимость экспериментальных данных и линии модели. Полученные значения коэффициентов составили $k = 0,287$, $d = 0,278$, $e = 9,09 \cdot 10^{-7}$, $f = 0,590$.

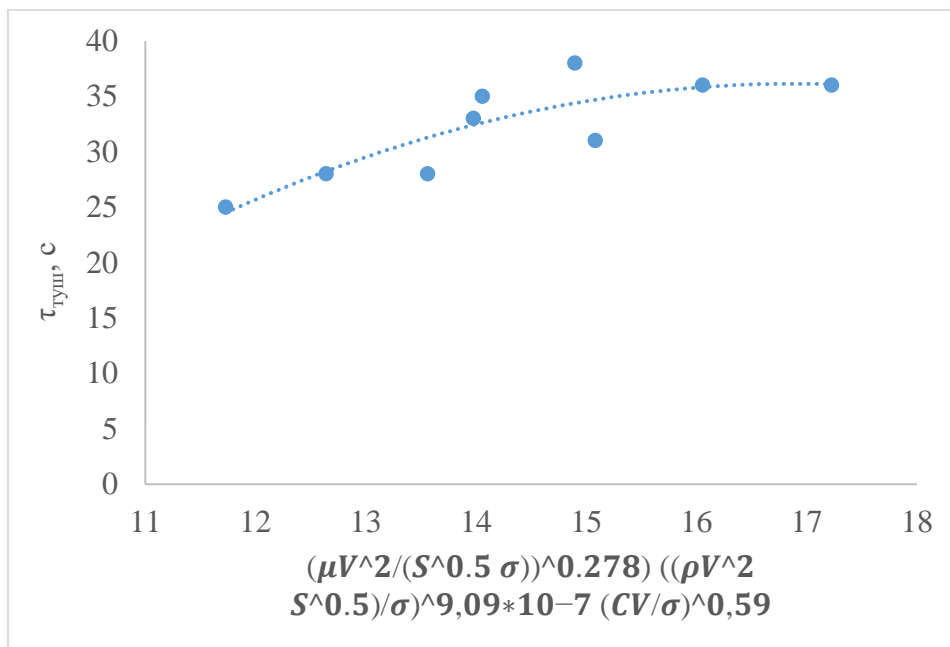


Рис. 4. Зависимость времени тушения от комплекса

$$\left(\frac{\mu V^2}{S^{0.5} \sigma}\right)^{0.278} \left(\frac{\rho V^2 S^{0.5}}{\sigma}\right)^{9,09 \cdot 10^{-7}} \left(\frac{CV}{\sigma}\right)^{0,59}$$

В связи с низкими значениями коэффициента $e = 9,09 \cdot 10^{-7}$, влиянием составляющего симплекса $\left(\frac{\rho V^2 S^{0.5}}{\sigma}\right)$ возможно пренебречь в связи с чем общее уравнение можно выразить в виде формулы 11.

$$\tau_{туш} = \frac{k S^{0.5}}{V} \left(\frac{\mu V^2}{S^{0.5} \sigma}\right)^d \left(\frac{C_{пены} V}{\sigma}\right)^f \quad (11)$$

Определение коэффициента пропорциональности и степенных показателей выполнено по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Полученная зависимость представлена на рисунке 5 и показывает достаточную сходимость экспериментальных данных и линии модели. Полученные значения коэффициентов составили $k = 0,286$, $d = 0,277$, $f = 0,590$.

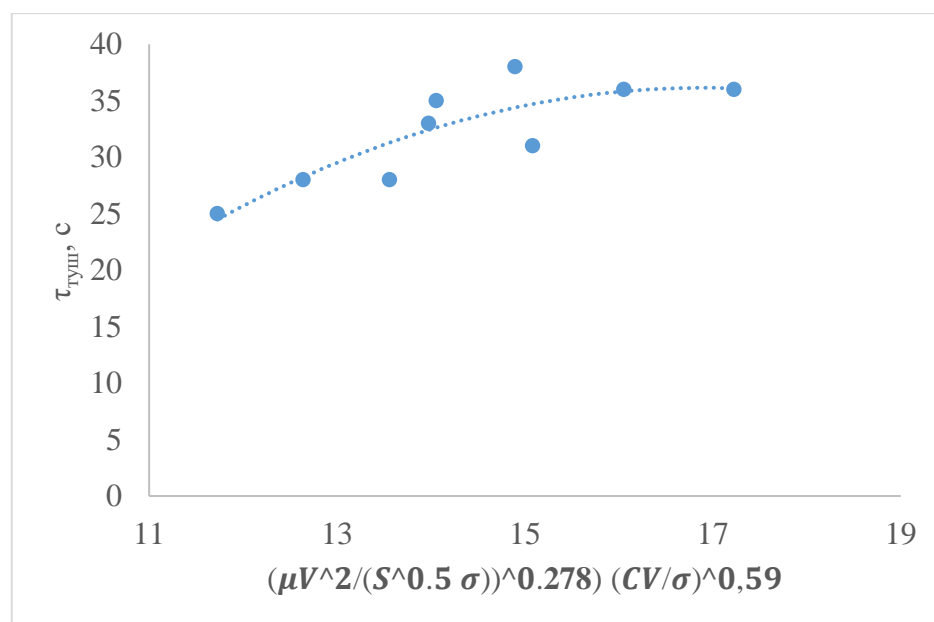


Рис. 5. Зависимость времени тушения от комплекса $\left(\frac{\mu V^2}{S^{0.5} \sigma}\right)^{0.278} \left(\frac{CV}{\sigma}\right)^{0.59}$

Относительная ошибка вычисления времени тушения не превышает 10-15%.

Заключение

Определено влияние физико-химических свойств на время тушения. Построенные графики зависимостей свидетельствуют о наличии некоего интервала значений основных физико-химических свойств, в границах которого для выбранного пенообразующего состава наблюдается снижение времени тушения. После выхода из этого интервала эффективность пенообразователя падает и время тушения увеличивается. Составлено уравнение модели на основе теории размерности. Полученная зависимость демонстрирует хорошую сходимость с экспериментальными данными – относительная ошибка вычислений составляет не более 15%.

Список литературы

1. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения: Пер. с нем. М.: Мир, 1980. – 208 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1972. — 330 с.
3. Сена Л. А., Единицы физических величин и их размерности, 3 изд., М. 1989.- 336 с.

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.

MODEL OF N-HEPTANE FIRE-FIGHTING FOAM EXTINGUISHING BASED ON DIMENSIONALITY THEORY

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

Tver State Technical University, Tver

Mathematical modeling is an integral part of modern physical chemistry. It allows you to analyze complex physical and chemical processes, predict their results and optimize the corresponding system. One such system is the process of extinguishing organic liquids with foams, which includes a wide range of parameters and factors affecting its effectiveness. Therefore, determining the correlation of the extinguishing time and the composition of the extinguishing foam solution is an urgent task of modern physical chemistry. This article presents a study of the possibility of determining the correlation between the extinguishing time of a standard fire and the physico-chemical characteristics of a foaming solution using the provisions of the theory of dimension. Previously, a series of experiments was conducted to determine the physico-chemical properties of foaming solutions. The influence of physico-chemical properties on the extinguishing time has been determined. The equation of the model has been compiled. The obtained dependence demonstrates sufficient convergence with experimental data.

Keywords: *foaming solutions, fire extinguishing, mathematical model, dimensionality theory.*

Дата поступления в редакцию: 15.05.2024.

Дата принятия в печать: 22.05.2024.