

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСТЕКАНИЯ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧЕЙ ЖИДКОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ИХ КОМПОНЕНТОВ

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Лихоманов А.О., Журов М.М.

Цель. Разработка регрессионной модели с помощью метода полного факторного эксперимента для исследования влияния массовой доли компонентов в растворе водного пленкообразующего огнетушащего состава на коэффициент растекания водной пленки по поверхности горючей жидкости и проведение оптимизации содержания компонентов состава для получения максимального коэффициента растекания.

Методы. В работе применены эмпирические методы исследования (измерение поверхностного и межфазного натяжения растворов), метод рандомизации и полного факторного эксперимента для получения регрессионной модели, а также модуль «Профили желательности» программного пакета STATISTICA. Определение поверхностного и межфазного натяжений растворов поверхностно-активных веществ в водных системах проводили методом отрыва кольца Дю Нуи на автоматическом тензиометре KRÜSS - K20.

Результаты. Представлены результаты полного факторного эксперимента, на основании которого получена регрессионная модель, описывающая изменение значения коэффициента растекания водной пленки пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости в зависимости от соотношения их компонентов. В ходе анализа полного факторного эксперимента определены значимые и незначимые факторы, а также проведено ранжирование значимых факторов по степени их влияния на коэффициент растекания водного пленкообразующего огнетушащего состава по поверхности горючей жидкости. Проведена оптимизация процентного соотношения компонентов состава для получения коэффициента растекания со значением 3,3 мН/м.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептуры пленкообразующих огнетушащих составов для тушения пожаров.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение, межфазное натяжение, полный факторный эксперимент, регрессионная модель, пенообразователь.

(Поступила в редакцию 11 октября 2024 г.)

Введение

Огнетушащая эффективность пленкообразующих огнетушащих составов зависит от ряда параметров, таких как коэффициент растекания пленкообразующего раствора по поверхности горючей жидкости, время жизни водной пленки на поверхности горючей жидкости, кратность и устойчивость образуемой пены и т.д. [1–4].

Водный раствор поверхностно-активных веществ растекается по поверхности горючей жидкости при условии, что сумма значений поверхностного натяжения водного раствора на границе с воздухом и межфазного поверхностного натяжения будет меньше поверхностного натяжения горючей жидкости. Для снижения поверхностного натяжения до необходимых величин в составе пленкообразующего раствора применяют фторированные ПАВ (далее – ФПАВ), для снижения межфазного натяжения углеводородные ПАВ (далее – УПАВ).

Для описания способности пленкообразующих огнетушащих составов растекаться по поверхности горючей жидкости (далее – ГЖ) используют коэффициент растекания, который рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{раст}} = \sigma_{\text{п.н}}^{\text{г.ж}} - (\sigma_{\text{п.н}}^{\text{р.п}} + \sigma_{\text{м/ф.ж}}^{\text{р.п}}), \quad (1)$$

где $\sigma_{п.н}^{г.ж}$ – поверхностное натяжение горючей жидкости, Н·м⁻¹;

$\sigma_{п.н}^{р.п}$ – поверхностное натяжение раствора пенообразователя, Н·м⁻¹;

$\sigma_{м/ф.ж}^{р.п}$ – межфазное натяжение между раствором пенообразователя и горючей жидкостью, Н·м⁻¹.

В соответствии с требованиями национального стандарта¹, предъявляющего технические требования к пенообразователям для тушения пожаров, поверхностное натяжение рабочего раствора пленкообразующих составов должно быть не более 17,5 мН/м, а величина межфазного натяжения рабочего раствора на границе с гептаном – не менее 1,5 мН/м. С учетом того что значения поверхностного натяжения наиболее распространенных пленкообразующих пенообразователей находятся в диапазоне от 15,5 до 17,5 мН/м, а межфазного натяжения в диапазоне от 1,5 до 3,0 мН/м, величина коэффициента растекания может быть от 0 до 3,5 мН/м.

Анализ результатов экспериментальных работ различных авторов по исследованию взаимосвязи поверхностной активности раствора пенообразователя и его огнетушащей эффективности подтверждают определяющую роль коэффициента растекания по поверхности горючей жидкости: чем больше величина коэффициента растекания, тем эффективнее пена тушит нефтепродукт [2; 3].

Таким образом, нахождение значений коэффициента растекания в зависимости от соотношения компонентов ПАВ различной природы при разработке рецептур пленкообразующих пенообразователей является первостепенной задачей. Для установления рабочих концентраций компонентов водного пленкообразующего огнетушащего состава ранее были проведены серии разведывательных экспериментов по установлению поверхностного и межфазного натяжений подходящих по свойствам растворов ПАВ [5; 6]. С целью исследования влияния количества каждого компонента в растворе на коэффициент растекания применен метод полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ). Данный метод позволяет существенно сократить количество экспериментов (наблюдений) для понимания природы исследуемого процесса. ПФЭ широко применяется для изучения влияния определенных факторов на исследуемый процесс и поиск их оптимальных значений, при которых этот процесс протекает требуемым образом [7].

Основная часть

Экспериментальное определение поверхностного и межфазного натяжений водных растворов огнетушащих составов проводилось с помощью автоматического тензиометра KRÜSS - K20. В качестве горючей жидкости применялся эталонный н-гептан с поверхностным натяжением ($\sigma_{п.н}^{г.ж}$), равным 20,5 Н·м⁻¹.

На основе анализа проведенных разведывательных экспериментов по изучению поверхностного и межфазного натяжений было принято решение о проведении полного факторного эксперимента (ПФЭ). В качестве независимых переменных уравнения регрессии были выбраны три главных фактора: массовые доли ФПАВ (X_1), неионогенного (X_2) и анионного (X_3) УПАВ со значениями $X_1 = 1; 2$ и 3 мас.%, $X_2 = 0,5; 1$ и $1,5$ мас.%, $X_3 = 0; 1,5$ и 3 мас.% соответственно. В качестве зависимой переменной уравнения регрессии был принят один отклик – коэффициент растекания ($K_{раст}$). ПФЭ проводился на трех уровнях для каждого из трех факторов сериями из пяти экспериментов, что составило 27 серий опытов (табл. 1). Поскольку зависимость коэффициента растекания от данных факторов не является линейной, для адекватного описания и анализа результатов экспериментов требуется как минимум три уровня. Каждый из этих опытов позволяет получить средние значения коэффициента расте-

¹ Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99; введ. 12.08.2016. – Минск, Госстандарт, 2016. – 42 с.

кания, которые затем могут быть использованы для выявления закономерностей и оптимизации значений $K_{\text{раст}}$. Для обеспечения достоверности результатов и исключения влияния систематических ошибок, которые могут возникнуть из-за внешних условий, порядок проведения серий экспериментов был определен случайным образом. Каждая серия из пяти экспериментов с определенной конфигурацией факторов проводилась в случайном порядке, что позволяет снизить вероятность искажения данных, вызванного изменениями в окружающей среде (температуры, влажности) или в результате внесения исследователем (человеческий фактор). Важность такого подхода к экспериментам заключается не только в получении точных данных, но и в возможности их дальнейшей интерпретации. С помощью анализа полученных данных можно выявить, как именно каждый из факторов влияет на $K_{\text{раст}}$.

Таблица 1. – План ПФЭ и его результаты

№	Значение фактора			Поверхностное натяжение, мН/м	Межфазное натяжение, мН/м	$K_{\text{раст}}$, мН/м	№	Значение фактора			Поверхностное натяжение, мН/м	Межфазное натяжение, мН/м	$K_{\text{раст}}$, мН/м
	X_1	X_2	X_3					X_1	X_2	X_3			
2.	1	0,5	1,5	15,27	2,63	2,6	10.	2	0,5	0	15,89	2,83	1,78
14.	2	1	1,5	15,42	2,1	2,98	22.	3	1	0	15,46	2,35	2,69
12.	2	0,5	3	15,3	2,76	2,44	21.	3	0,5	3	14,81	2,98	2,71
6.	1	1	3	16,42	1,01	3,07	1.	1	0,5	0	15,74	2,62	2,14
11.	2	0,5	1,5	15,31	2,91	2,28	23.	3	1	1,5	15,94	2,12	2,44
8.	1	1,5	1,5	15,91	1,34	3,25	17.	2	1,5	1,5	15,71	1,71	3,08
7.	1	1,5	0	16,22	1,16	3,12	4.	1	1	0	15,99	1,84	2,67
20.	3	0,5	1,5	15,71	2,97	1,82	25.	3	1,5	0	16,01	2,46	2,03
9.	1	1,5	3	15,91	1,35	3,24	27.	3	1,5	3	15,72	1,77	3,01
3.	1	0,5	3	15,36	2,35	2,79	19.	3	0,5	0	15,86	3,08	1,56
26.	3	1,5	1,5	15,72	1,79	2,99	18.	2	1,5	3	15,69	1,65	3,16
16.	2	1,5	0	15,98	1,48	3,04	15.	2	1	3	15,56	2,2	2,74
5.	1	1	1,5	15,72	1,49	3,29	24.	3	1	3	15,44	2,39	2,67
13.	2	1	0	15,62	2,04	2,84							

Для избежания допущения ошибок в расчетах и иллюстративного представления полученных данных анализ ПФЭ осуществлялся с помощью программного пакета для статистического анализа STATISTICA (компания StatSoft, Inc., США), которая является одним из ведущих программных продуктов для обработки и анализа данных в различных сферах деятельности от научных лабораторий и технических университетов до финансовых учреждений и государственных организаций [7].

На основании результатов ПФЭ возможно построение регрессионных моделей трех типов: без учета взаимодействия факторов, с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка, с учетом взаимодействий главных факторов и квадратов главных факторов 2-го порядка. Кроме того, в каждую из вышеуказанных моделей могут включаться факторы, возведенные во вторую степень. Выбор типа модели осуществлялся по коэффициенту детерминации R^2 , который показывает долю изменяемости отклика, происходящую при одновременном воздействии всех включенных в модель факторов. Чем больше значение данного коэффициента ($0 \leq R^2 \leq 1$), тем выше качество модели (точность описания взаимосвязи между факторами и откликом по результатам экспериментов). Так, для модели первого типа коэффициент детерминации оказался равным $R^2 \approx 0,79$, для модели второго типа – $R^2 \approx 0,82$ и для модели третьего типа – $R^2 \approx 0,91$. Несмотря на высокое значение коэффициента детерминации для модели третьего типа, анализ уровня статистической значимости главных факторов не позволяет подтвердить с достаточной степенью уверенности их влияние на отклик, ввиду

чего для анализа принята модель второго типа с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка.

Модель второго типа с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка в натуральном масштабе переменных будет выглядеть следующим образом:

$$K_{\text{раст}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_3 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_9$ – коэффициенты уравнения регрессии в натуральном масштабе переменных. Данные коэффициенты имеют размерность, обратную размерности переменных (или произведению переменных) при них.

Перед построением самой регрессионной модели крайне важно убедиться в отсутствии мультиколлинеарности – сильной линейной зависимости между независимыми переменными. Мультиколлинеарность искажает оценки коэффициентов регрессии, затрудняет интерпретацию результатов и делает невозможным достоверное определение вклада каждого фактора в изменение отклика. Для выявления мультиколлинеарности был рассчитан матричный коэффициент корреляции Пирсона, результаты которого были сведены в корреляционную матрицу. Анализ этой матрицы показал, что ни один из коэффициентов корреляции между независимыми переменными не превысил по модулю значения 0,75. Наиболее высокая корреляция между парой факторов составила 0,65. Это значение хотя и свидетельствует о наличии некоторой связи между факторами, не является критическим для регрессионного анализа и не указывает на значительную мультиколлинеарность. Таким образом, можно заключить, что использование построенной модели (2) для ранжирования факторов по степени их влияния на коэффициент растекания является обоснованным. Однако необходимо отметить, что наличие корреляции между факторами, даже не достигающей уровня мультиколлинеарности, может усложнять интерпретацию результатов. Сильная корреляция между независимыми переменными означает, что эти переменные частично отражают одну и ту же информацию, что может привести к неточному определению вклада каждой из них в зависимую переменную. Поэтому желательно оценить не только корреляцию между независимыми переменными, но и их влияние на $K_{\text{раст}}$, чтобы получить более полную картину. Анализ корреляционной матрицы позволил определить степень корреляции каждого фактора с коэффициентом растекания. Была обнаружена умеренная корреляционная связь (в диапазоне $0,25 < |r| \leq 0,75$) между откликом и факторами X_1 ($r = -0,41$), X_2 ($r = 0,65$) и X_3 ($r = 0,38$). Знак «-» перед коэффициентом корреляции указывает на обратную зависимость: увеличение значения фактора приводит к уменьшению $K_{\text{раст}}$ [8]. На основе полученных коэффициентов корреляции можно предварительно оценить влияние факторов на коэффициент растекания. Наиболее сильное влияние оказывает фактор X_2 ($r = 0,65$), затем X_1 ($r = -0,41$) и X_3 ($r = 0,38$). Однако эта оценка основана только на корреляционном анализе и не учитывает другие возможные факторы, которые могут влиять на $K_{\text{раст}}$. Для более точной оценки необходимо использовать результаты регрессионного анализа, которые позволяют учесть совместное влияние всех факторов и определить их вклад в модель с учетом возможных взаимодействий. Следует отметить, что выбор порога в 0,75 для определения мультиколлинеарности – это условное значение. В некоторых случаях может быть использован более строгий порог, например 0,8 или 0,9, в зависимости от специфики задачи и требований к точности оценки.

Для подтверждения результатов, полученных методом корреляционного анализа, и проверки статистической значимости выявленных связей было проведено исследование с помощью дисперсионного анализа ANOVA (от англ. Analysis of Variance), реализованного в статистическом пакете STATISTICA. Результаты этого анализа представлены в таблице 2. Дисперсионный анализ позволяет оценить влияние нескольких независимых переменных

(факторов) на одну зависимую переменную (отклик). В отличие от корреляционного анализа, который лишь показывает наличие связи между переменными, ANOVA позволяет установить, насколько значимо это влияние. Основная задача ANOVA заключается в разбиении общей дисперсии зависимой переменной на составляющие, объясняемые действием различных факторов, и остаточную дисперсию, обусловленную случайными ошибками.

Таблица 2. – Результаты дисперсионного анализа с учетом незначимых факторов и без их учета

Фактор (регрессор)	С учетом незначимых факторов		Без учета незначимых факторов	
	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости, p	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости, p
X_1	1,003472	0,000844	1,003472	0,000468
X_1^2	0,006446	0,749843	исключен	
X_2	2,568889	0,000006	2,568889	0,000001
X_2^2	0,259030	0,055661	0,259030	0,048874
X_3	0,871200	0,001536	0,871200	0,000926
X_3^2	0,057363	0,347248	исключен	
X_1X_2	0,001633	0,872346	исключен	
X_1X_3	0,073633	0,288684	исключен	
X_2X_3	0,128133	0,166696	исключен	
Ошибка ¹	1,043519	0,055661	1,310728	
Общая сумма квадратов отклонений	6,013319	–	6,013319	–

Примечание. ¹ Ошибка отражает ту часть изменчивости, которая не может быть объяснена факторами, участвующими в анализе, и показывает, насколько точны выводы и велика роль случайных факторов в полученных результатах.

Традиционно, если p -значение меньше 0,05, нулевая гипотеза (гипотеза об отсутствии влияния фактора) отвергается, и влияние фактора считается статистически значимым. Из анализа таблицы 2 к значимым факторам относятся X_1 , X_2 , X_3 . Это не означает автоматического подтверждения отсутствия влияния остальных регрессоров на отклик, а лишь свидетельствует о недостаточности данных для доказательства их влияния на выбранном уровне значимости. Кроме того, поскольку уровень статистической значимости X_2^2 незначительно отличается от $p = 0,05$, было принято решение данный фактор в модели оставить. Для более глубокого понимания стоит проанализировать размеры эффекта этого фактора, чтобы оценить практическую значимость наблюдаемых различий, даже если он статистически незначим: небольшое, но статистически значимое различие может быть практически несущественным, в то время как большое, но статистически незначимое различие может иметь важное практическое значение. После исключения незначимых факторов влияние фактора X_2^2 стало статистически значимым ($p = 0,048874$).

Исключение незначимых факторов преобразует рассматриваемую модель в следующий вид:

$$K_{\text{раст}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_2^2 + b_4X_3. \quad (3)$$

Результаты дисперсионного анализа модели без учета незначимых факторов демонстрируют высокий коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,78$, что указывает на то, что уточненная модель достаточно точно описывает влияние независимых переменных (факторов X_1 , X_2 и X_3) на исследуемый отклик ($K_{\text{раст}}$). Это говорит о том, что около 78 % вариации в $K_{\text{раст}}$ может быть объяснено включенными в модель факторами. Остальные 22 % объясняются либо случайными ошибками, либо влиянием неучтенных переменных. Важно отметить, что сумма квадратов отклонений для каждого фактора пропорциональна его вкладу в объяснение дисперсии зависимой переменной и анализ сумм квадратов отклонений (ANOVA) для каждого фактора (табл. 2) позволяет оценить вклад каждого фактора в общую изменчивость

отклика. Согласно представленным данным наибольшее влияние на коэффициент растекания раствора оказывает фактор X_2 , объясняя приблизительно 42,7 % от общей суммы квадратов отклонений. Это существенно больше, чем вклад других факторов. После фактора X_2 по значимости идет фактор X_1 ($\approx 16,7$ %), а затем X_3 ($\approx 14,5$ %). Наличие X_2^2 ($\approx 4,3$ %) в уравнении регрессии свидетельствует о нелинейном характере влияния фактора X_2 . Низкое значение суммы квадратов отклонений для X_2^2 (менее 5 %) подтверждает гипотезу о второстепенном влиянии этого фактора на коэффициент растекания. Полученные результаты дисперсионного анализа согласуются с выводами корреляционного анализа, что говорит о внутренней согласованности результатов, полученных с помощью различных статистических методов.

Для определения количественного влияния различных факторов на коэффициент растекания был применен метод оценки эффектов. Величина эффекта ΔK показывает абсолютное изменение коэффициента растекания при изменении соответствующего фактора от минимального до максимального значения [7]. В таблице 3 представлены эффекты каждого фактора и свободного члена регрессионного уравнения, который отражает базовое значение коэффициента растекания при нулевых значениях всех факторов. Этот свободный член важен для построения полной модели и прогнозирования коэффициента растекания в различных условиях.

Таблица 3. – Результаты оценки эффектов факторов

Фактор (регрессор)	Эффект ΔK	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижнее знач.	Верхнее знач.
Свободный член	2,821111	0,081362	34,67341	0,000000	2,652376	2,989846
X_1	-0,472222	0,115064	-4,10400	0,000468	-0,710850	-0,233595
X_2	0,755556	0,115064	6,56641	0,000001	0,516928	0,994183
X_2^2	-0,415556	0,199296	-2,08511	0,048874	-0,828871	-0,002240
X_3	0,440000	0,115064	3,82397	0,000926	0,201372	0,678628

Анализ эффектов позволил ранжировать факторы по степени их влияния на коэффициент растекания. Самыми значимыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на изменчивость коэффициента растекания, оказались, согласно дисперсионному анализу, X_2 , X_1 и X_3 , с оценками эффектов приблизительно 0,76, 0,47 и 0,44 соответственно. Это означает, что изменение фактора X_2 от минимального до максимального значения приводит к наибольшему изменению коэффициента растекания, затем идет фактор X_1 , а за ним следует фактор X_3 .

Таблица 3, помимо самих эффектов, содержит также важные статистические показатели, позволяющие оценить надежность полученных результатов. Стандартная ошибка характеризует точность оценки эффекта и показывает, насколько сильно могут колебаться полученные значения эффекта при повторном проведении эксперимента. Чем меньше стандартная ошибка, тем точнее оценка. Для проверки значимости эффектов использовались значения t -статистики Стьюдента. Значения уровня значимости $p < 0,05$ (вероятность ошибочно отклонить нулевую гипотезу о том, что эффект фактора равен нулю) свидетельствуют о статистически значимом влиянии фактора на коэффициент растекания. Приведен доверительный интервал для эффектов, в пределах которых с вероятностью 95 % находится истинный эффект фактора. Широкий доверительный интервал указывает на большую неопределенность оценки.

На основании проведенного анализа ПФЭ можно заключить, что на коэффициент растекания значимо влияют все главные факторы X_1 , X_2 , X_3 а также регрессор X_2^2 . Согласно оценке эффектов факторов (рис. 1) увеличение массовой доли факторов X_2 и X_3 приводит к повышению коэффициента растекания, а увеличение регрессоров X_1 и X_2^2 наоборот способствует снижению коэффициента растекания.

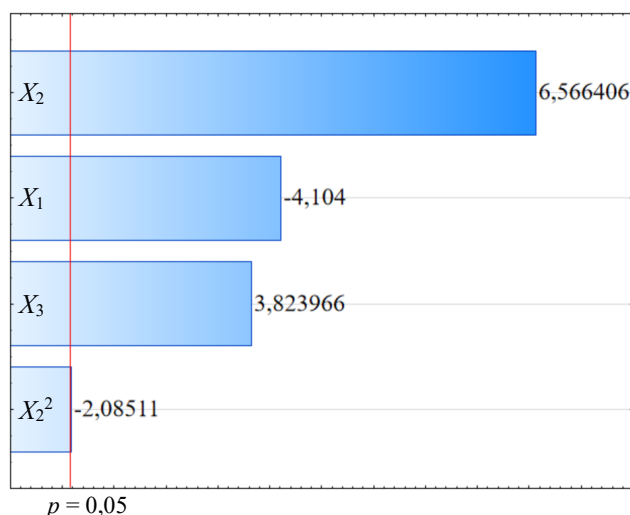


Рисунок 1. – Результаты оценки эффектов факторов

Далее выполнена оценка коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_4$, уравнения регрессии (3) результаты которой представлены в таблице 4. Численные значения коэффициентов имеют размерность, обратную размерности факторов (или произведению факторов) при них. Здесь следует отметить, что уровень статистической значимости для всех факторов оказался ниже 0,05, т.е. факторы, для которых следует считать верной гипотезу о равенстве нулю коэффициента при данном факторе и исключить его из модели, отсутствуют.

Таблица 4. – Оценка коэффициентов уравнения регрессии

Фактор	Коэффициент регрессии, b_i	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижнее знач.	Верхнее знач.
Свободный член	1,486667	0,377262	3,94068	0,000697	0,70427	2,269060
X_1	-0,236111	0,057532	-4,10400	0,000468	-0,35542	-0,116797
X_2	2,417778	0,805446	3,00179	0,006567	0,74738	4,088172
X_2^2	-0,831111	0,398593	-2,08511	0,048874	-1,65774	-0,004481
X_3	0,146667	0,038355	3,82397	0,000926	0,06712	0,226209

Конечный вид разработанной модели в натуральном масштабе переменных для прогнозирования коэффициента растекания следующий:

$$K_{\text{раст}} = 1,486667 - 0,236111X_1 + 2,417778X_2 - 0,831111X_2^2 + 0,146667X_3. \quad (4)$$

Подстановка всех возможных комбинаций факторов согласно плану ПФЭ в формулу (4) приводит к результатам, отличающимся от экспериментальных в среднем не более чем на 7,2 % (наибольшее отклонение 22,1 %).

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков. Под остатками подразумеваются разности между экспериментальными значениями отклика и их предсказанными значениями по модели.

В первую очередь остатки должны быть случайными величинами и не должны зависеть от предсказанных по модели значений зависимой переменной. Для проверки данного условия построена диаграмма рассеяния остатков в зависимости от предсказанных по модели значений зависимой переменной (рис. 2). Исходя из полученных результатов следует отметить, что систематической зависимости величины остатков от предсказанных значений отклика не наблюдается, следовательно, по данному критерию модель можно считать адекватной.

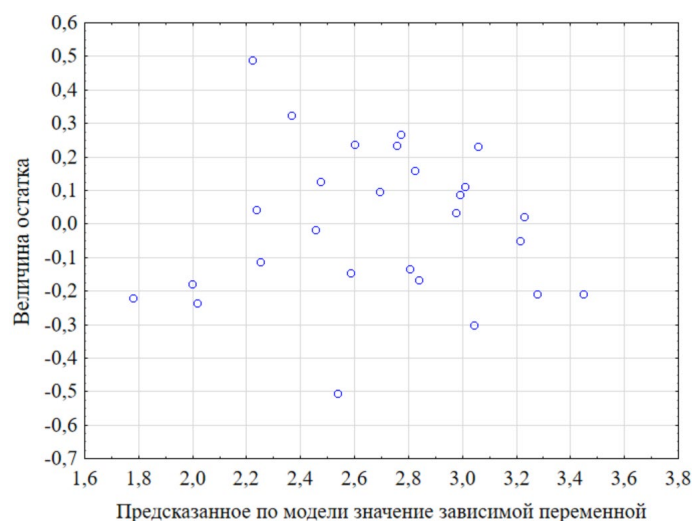


Рисунок 2. – Диаграмма рассеяния остатков

Еще одним критерием адекватности модели является распределение величин остатков. Остатки должны быть распределены нормально и иметь математическое ожидание, близкое к нулю. Для визуальной оценки нормальности распределения остатков в первую очередь можно воспользоваться гистограммой остатков (рис. 3) и вероятностным графиком остатков (рис. 4).

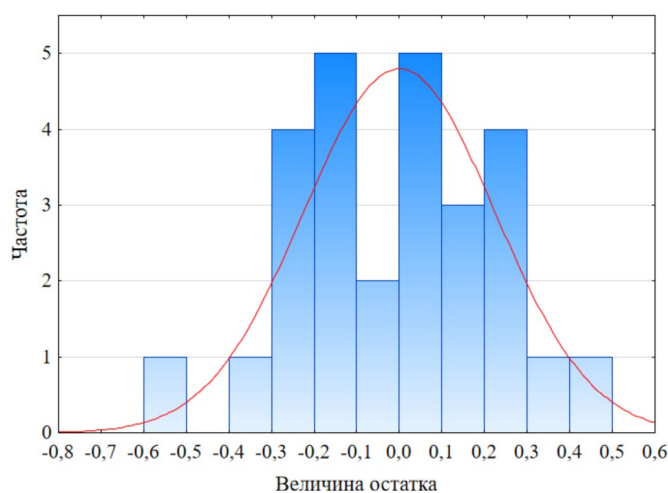


Рисунок 3. – Гистограмма распределения остатков

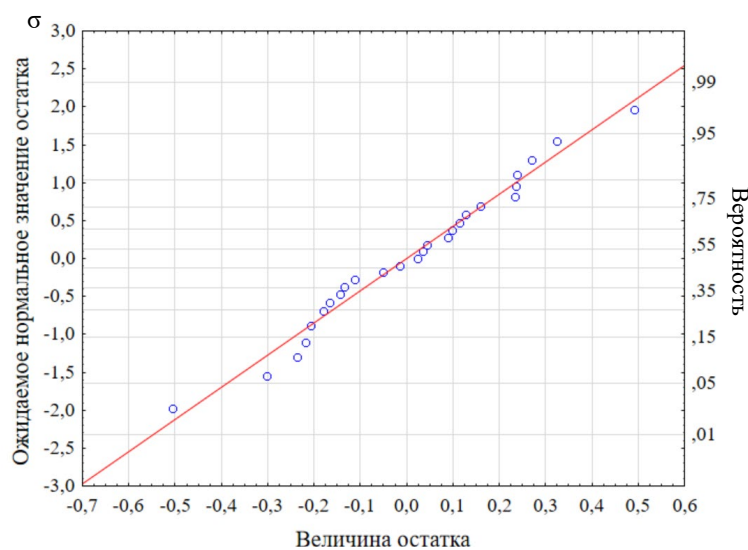


Рисунок 4. – Вероятностный график остатков

Таким образом, результаты проведенных анализов остатков показали адекватность построенной модели для прогнозирования значений зависимой переменной.

Оптимизация процентного соотношения компонентов состава водного пленкообразующего пенообразователя. Для анализа влияния факторов на значение отклика и поиска процентного соотношения компонентов состава, при которых значение коэффициента растекания будет составлять максимальное значение, применялся инструмент «Профили желательности» (Desirability Profiles) [9]. Профили желательности строятся на основе функции желательности, которая описывает взаимосвязь между предсказанными значениями зависимой переменной и их желательностью. Функция желательности позволяет выделить диапазоны значений, которые являются приемлемыми или предпочтительными для исследуемой переменной. Для построения этой функции необходимо определить три ключевые точки желательности. Первая точка соответствует наибольшей желательности, в нашем случае это максимальное значение зависимой переменной $K_{\text{раст}}$, равное 3,3 мН/м. Вторая точка – это наименьшая желательность, что соответствует минимальному значению $K_{\text{раст}}$, равному 1,56. Эта точка показывает, какие значения являются неприемлемыми или нежелательными. Третья точка – это среднее значение между первой и второй точками, которое составляет 2,42. Эта точка служит ориентиром для определения промежуточных значений, которые могут быть также полезны в процессе оптимизации. После задания исходных данных, модели (4) и трех точек желательности строится оптимальный профиль желательности, который в виде графика отображает, как изменения факторов могут повлиять на желаемую зависимую переменную (рис. 5).

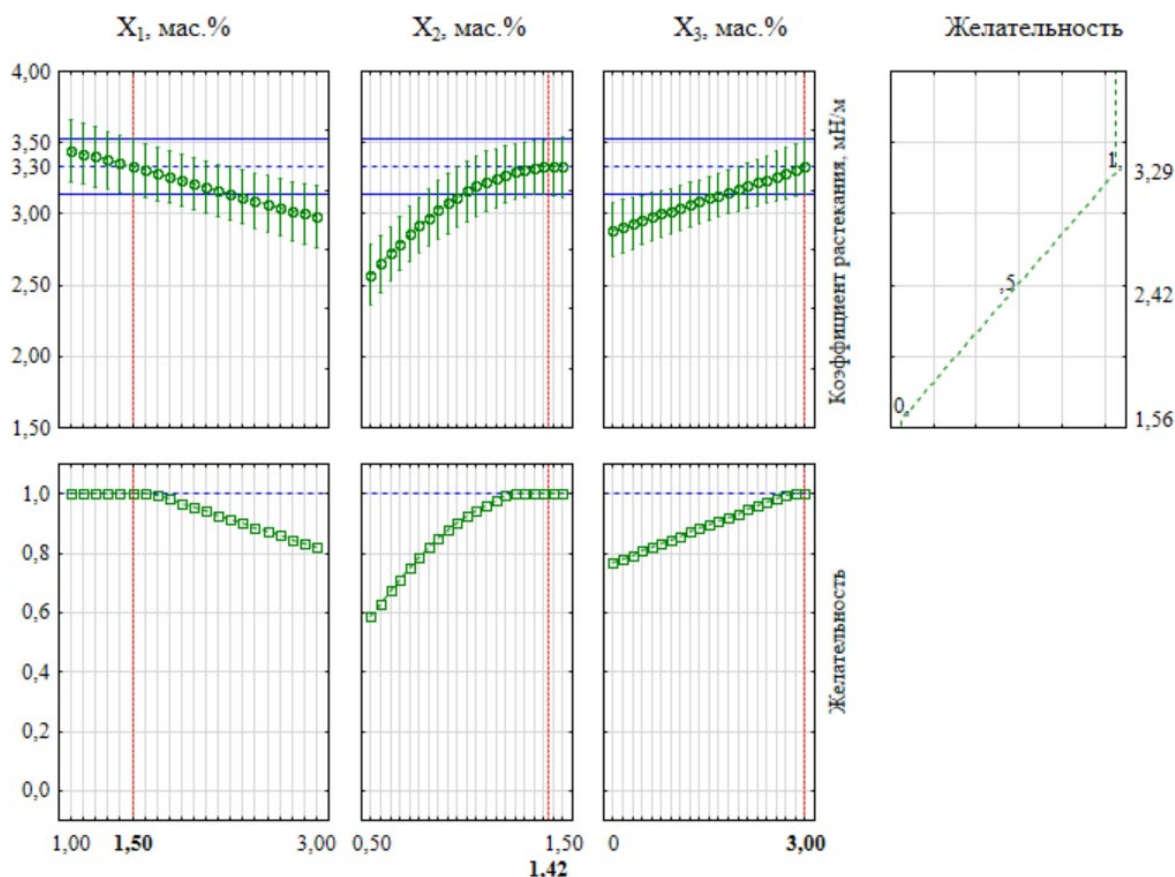


Рисунок 5. – Оптимальный профиль желательности

Графическое представление включает в себя два ряда графиков. Каждый график верхнего ряда отображает зависимость $K_{\text{раст}}$ от одной независимой переменной (X_1 , X_2 и X_3) при фиксированных оптимальных значениях двух других переменных. Это позволяет визуализировать влияние каждой из переменных изолированно, что крайне важно для понимания их

индивидуального вклада в общий результат. В нижнем ряду представлены графики зависимости функции желательности (критерий, отражающий близость к оптимальным значениям всех параметров одновременно) от каждой из независимых переменных. Функция желательности, как правило, нормализована к диапазону $[0; 1]$, где 1 соответствует оптимальному сочетанию факторов. Красные линии на этих графиках обозначают оптимальные значения каждой переменной (X_1 , X_2 , X_3), достигающие максимального значения функции желательности. Из анализа графиков можно сделать вывод, что для $K_{\text{раст}} = 3,3$ мН/м максимальный уровень желательности, равный 1, достигается при следующих значениях независимых переменных: $X_1 = 1,60$ мас.%; $X_2 = 1,41$ мас.%; $X_3 = 3,00$ мас.% (на графике указанные значения выделены жирным шрифтом). Независимая переменная X_1 , исходя из планомерного спада функции желательности, приняла свое оптимальное значение. Наибольшее значение функции желательности для независимой переменной X_2 определено однозначно и совпадает со значением ее экстремума. Наибольшее значение функции желательности для независимой переменной X_3 находится на границе диапазона его значений. В связи с этим необходимо дополнительно исследовать диапазоны значений анионного УПАВ $X_3 = 3\text{--}4$ мас.% [6].

Заключение

В ходе экспериментального исследования, проведенного методом ПФЭ, была разработана регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента растекания от мас.% трех ключевых компонентов: ФПАВ, неионогенного УПАВ и анионного УПАВ с низкой пенообразующей способностью. Адекватность модели была оценена с использованием коэффициента детерминации R^2 . Близкое к единице значение коэффициента детерминации (полученное значение составило 0,78) свидетельствует о достаточно высокой точности модели. Сравнение предсказанных моделью значений коэффициента растекания с экспериментальными данными показало незначительное расхождение, не превышающее в среднем 7,2 % (наибольшее отклонение 22,1 %), что подтверждает высокую предсказательную способность модели в заданном диапазоне концентраций компонентов состава.

Анализ структуры регрессионной модели позволил установить, что наиболее существенно на величину коэффициента растекания влияет фактор X_2 (массовая доля неионогенного УПАВ). Относительно меньший эффект на изменение коэффициента растекания оказывают факторы X_1 (массовая доля ФПАВ), X_3 (массовая доля анионного УПАВ) и X_2^2 . Увеличение массовой доли факторов X_2 и X_3 приводит к повышению коэффициента растекания, а регрессоры X_1 и X_2^2 отвечают за снижение коэффициента растекания.

Оптимизация процентного соотношения компонентов состава для коэффициента растекания $K_{\text{раст}} = 3,3$ мН/м позволило получить следующие оптимальные значения: количество ФПАВ $X_1 = 1,60$ мас.%, количество неионогенного УПАВ $X_2 = 1,42$ мас.% и количество анионного УПАВ $X_3 = 3,00$ мас.%. Регрессионная модель, а также результаты оптимизации процентного соотношения компонентов водного пленкообразующего огнетушащего состава подлежат практической проверке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т23М-061 «Пленкообразующий огнетушащий состав для автоматических установок пожаротушения водой и пеной на основе фторированных поверхностно-активных веществ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шароварников, А.Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение / А.Ф. Шароварников, С.А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 335 с. – EDN UWCCSP.
2. Хиль, Е.И. Сравнительная огнетушащая эффективность углеводородных и фторсодержащих пенообразователей / Е.И. Хиль, М.И. Саутиев, А.Ф. Шароварников, Д.Л. Бастриков // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 2. – С. 71–75. – EDN: TSLNIF.

3. Корольченко, Д.А. Анализ огнетушащей эффективности пен низкой кратности, полученных из фторсодержащих и углеводородных пенообразователей / Д.А. Корольченко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 3. – С. 37–43. – DOI: 10.25257/FE.2016.3.37-43. – EDN: WVJATX.
4. Каттге, А. Влияние фторированного стабилизатора на огнетушащую эффективность пены / А. Каттге, Е.И. Хиль // Пожарная безопасность. – 2016. – № 3. – С. 89–93. – EDN WMZFLJ.
5. Иванов, И.Ю. Обзор основных характеристик пленкообразующих пенообразователей и способы их контроля / И.Ю. Иванов, Я.А. Кондакова, О.Д. Навроцкий // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Иваново, 14 октября 2021 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 41–47. – EDN: PATKDW.
6. Иванов, И.Ю. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, Я.А. Кондакова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 415–428. – DOI 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. – EDN: DGPXST.
7. Халафян, А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учеб. пособие / А.А. Халафян. – М.: Либроком, 2013. – 384 с.
8. Соколовская, И.Ю. Полный факторный эксперимент: метод. указания / И.Ю. Соколовская. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.
9. Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учеб. / А.А. Халафян. – 3-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

**Регрессионная модель прогнозирования коэффициента растекания
пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости
от соотношения их компонентов**

**Regression model for predicting the effectiveness of flow of film-forming fire extinguishing
compositions over the surface of combustible liquid from the ratio of their components**

Иванов Игорь Юрьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
SPIN-код: 3880-5485

Igor Yu. Ivanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1072-2432

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
SPIN-код: 4031-1141

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4137-2519

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: alexlikh20@gmail.com
SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: alexlikh20@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9374-1486
ScopusID: 57210911673

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Zhurmark@mail.ru
SPIN-код: 8325-4796

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological,
Radiation and Nuclear Protection,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Zhurmark@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5228-7371

REGRESSION MODEL FOR PREDICTING THE EFFECTIVENESS OF FLOW OF FILM-FORMING FIRE EXTINGUISHING COMPOSITIONS OVER THE SURFACE OF COMBUSTIBLE LIQUID FROM THE RATIO OF THEIR COMPONENTS

Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M.

Purpose. Development of a regression model using the full factorial experiment method to study the influence of the mass fraction of components in a solution of an aqueous film-forming fire extinguishing composition on the spreading coefficient of the aqueous film over the surface of a flammable liquid and optimizing the content of the composition components to obtain the maximum flow coefficient.

Methods. The work uses empirical research methods (measurement of surface and interfacial tension of solutions), the method of randomization and full factorial experiment to obtain a regression model, as well as the «Desirability Profiles» module of the STATISTICA software package. The determination of surface and interfacial tension of solutions of surfactants in water systems was made by the method of tearing off Du Nouy rings on an automatic tensiometer KRÜSS - K20.

Findings. The article presents the results of a complete factorial experiment, on the basis of which a regression model was obtained that describes the change in the value of the coefficient of flow of an aqueous film of film-forming fire extinguishing compositions on the surface of a flammable liquid depending on the ratio of their components. During the analysis of the complete factorial experiment, significant and insignificant factors were determined, and a ranking of significant factors was carried out according to the degree of their influence on the coefficient of flow of an aqueous film-forming fire extinguishing composition on the surface of a flammable liquid. The percentage ratio of the composition components was optimized to obtain a flow coefficient equal to 3.3 mN/m.

Application field of research. The obtained results can be used in developing the formulation of film-forming fire extinguishing compositions for extinguishing fires.

Keywords: surfactants, surface tension, interfacial tension, full factorial experiment, regression model, foaming agent.

(The date of submitting: October 11, 2024)

REFERENCES

1. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye* [Foam concentrates and fire extinguishing foam, Structure, properties, application]. Moscow: Pozhnauka, 2005. 335 p. (rus). EDN: UWCCSP.
2. Hil' E.I., Sautiev M.I., Sharovarnikov A.F., Bastrikov D. L. Sravnitel'naya ognetyushashchaya effektivnost' uglevodorodnykh i ftorsoderzhashchikh penoobrazovateley [Comparative extinguishing efficiency of hydrocarbon and fluorinated foaming agents]. *Fire and Explosion Safety*, 2015. Vol. 24, No. 2. Pp. 71–75. (rus). EDN: TSLNIF.
3. Korol'chenko D.A. Analiz ognetyushashchey effektivnosti pen nizkoy kratnosti, poluchennykh iz ftorsoderzhashchikh i uglevodorodnykh penoobrazovateley [Analysis of extinguishing efficiency of low expansion foam produced from fluorine containing and hydrocarbonic foam compounds]. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2016. No. 3. Pp. 37–43. (rus). DOI: 10.25257/FE.2016.3.37-43. EDN: WVJATX.
4. Kattge A., Hil' E. I. Vliyanie ftorirovannogo stabilizatora na ognetyushashchuyu effektivnost' peny [The influence of fluorinated stabilizer on extinguishing efficiency of the foam]. *Fire Safety*, 2016. No. 3. Pp. 89–93. (rus). EDN: WMZFLJ.
5. Ivanov I.Yu., Kondakova Ya.A., Navrotskiy O.D. Obzor osnovnykh kharakteristik plenkoobrazuyushchikh penoobrazovateley i sposoby ikh kontrolya [Overview of the main characteristics of film forming foaming agents and methods of their control]. *Proc. of V Intern. scientific-practical conf. «Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii»*, Ivanovo, Oktober 14, 2021. Ivanovo: Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2021. Pp. 41–47. (rus). EDN: PATKDW.
6. Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D., Kondakova Ya.A., Krasavin V.E., Busel M.O. Issledovanie ftorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlya razrabotki plenkoobrazuyushchego ognetyushashchego sostava [Research of fluorinated surfactants for the development of a film-forming fire extinguishing

- composition]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 415–428. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGPXST.
7. Khalafyan A.A. *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA* [Industrial statistics: quality control, process analysis, experiment design in STATISTICA]: tutorial. Moscow: Librokom, 2013. 384 p. (rus)
 8. Sokolovskaya I.Yu. *Polnyy faktornyy eksperiment* [Full factorial experiment]: methodological instructions. Novosibirsk: NGAVT, 2010. 36 p. (rus)
 9. Khalafyan A.A. *STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [STATISTICA 6. Statistical analysis of data]: textbook. Moscow: Binom-Press, 2007. 512 p. (rus)

Copyright © 2024 Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.