

П. В. Лыков, В. И. Дудкин

Статистическая оценка степени воздействия высокочастотного электромагнитного поля на кинематическую вязкость рапсового масла

P. V. Lykov, V. I. Dudkin

Statistical Assessment of Degree of Influence of a High-Frequency Electromagnetic Field on a Kinematic Viscosity of a Rapeseed Oil

Приводятся результаты математического моделирования по сравнительному анализу влияния внешних факторов (параметров ВЧ-поля и температуры) на кинематическую вязкость рапсового масла. Исходя из начальных условий состояния жидкости и варьирования значений выбранных факторов в заданном интервале составлена математическая модель. На основании анализа модели установлено, что преобладающее влияние на кинематическую вязкость оказывает напряжение ВЧ-поля.

Ключевые слова: влияние высокочастотного электромагнитного поля, кинематическая вязкость, рапсовое масло, планирование эксперимента.

DOI 10.14258/izvasu(2013)3.2-41

Для оценки степени влияния параметров высокочастотного электромагнитного поля (ВЧ ЭМП) на вязкость рапсового масла и нахождения количественной взаимосвязи между ними применен метод факторного планирования [1].

Объектом данного исследования является рапсовое масло, кинематическая вязкость которого в начальном состоянии (температура 20 °С) составляет 76,05 мм/с². Для упрощения проведения эксперимента нижний уровень фактора температуры принят за начальное состояние. Методика облучения масла в ячейке, приборы и схема ячейки, использовавшиеся в эксперименте, подробно описаны в [2].

1. Выбор и кодирование факторов.

В качестве возмущающих факторов приняты: температура жидкости и параметры ВЧ ЭМП (напряжение и длительность полевого воздействия). Обязательным условием планирования эксперимента является возвращение жидкости к начальному состоянию после внешнего воздействия.

При планировании эксперимента принято вместо реальных (натуральных) уровней использовать кодированные значения возмущающих факторов x_i :

In the present article results of mathematical modeling under the relative analysis of influence of external factors (parameters of a high-frequency electromagnetic field and temperature) on kinematic viscosity of rapeseed oil are shown. Proceeding from initial conditions of a liquid state and a values variation of the chosen factors in the set interval the mathematical model is compounded. On the basis of the model analysis it is positioned that prevailing influence on a kinematic viscosity renders a high-frequency electromagnetic field voltage.

Key words: influence of a high-frequency electromagnetic field, kinematic viscosity, rapeseed oil, experiment planning.

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \hat{x}_i^0}{\Delta x_i}, \quad (1)$$

где \tilde{x}_i — натуральное значение фактора; \hat{x}_i^0 — натуральное значение основного (нулевого) уровня; Δx_i — интервал варьирования; i — номер фактора.

Основной уровень \hat{x}_i^0 является средним значением верхнего x_{\max} и нижнего x_{\min} уровней возмущающего фактора x_i :

$$\hat{x}_i^0 = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}. \quad (2)$$

Интервал варьирования Δx_i находится по формуле

$$\Delta x_i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}. \quad (3)$$

Действительные и кодированные значения возмущающих факторов представлены в таблице 1.

2. Планирование и проведение эксперимента.

Для планирования полного факторного эксперимента 2³ составим матрицу (x_{ij}) (табл. 2) с учетом рандомизации и повторяемости опытов в эксперименте.

Сводная таблица возмущающих факторов

Факторы	Основной уровень \hat{x}_i^0	Интервал варьирования Δx_i	Нижний уровень x_{\min}		Верхний уровень x_{\max}	
			Действительное значение	Кодированное значение	Действительное значение	Кодированное значение
Напряжение (x_1), $U_{\text{вых}}, \text{В}$,	3,0	$\pm 3,0$	0,0	-1	6,0	+1
Температура (x_2), $T, \text{К}$	308	± 15	293	-1	323	+1
Длительность (x_3), $\tau, \text{мин}$	30	± 30	0	-1	60	+1

Таблица 2
Матрица планирования эксперимента 2³

№ п/п	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
5	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1

Облучение рапсового масла проводили на частоте 60 МГц.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3, где η_1, η_2 — параметры отклика (кинематической вязкости) на действие возмущающих факторов x_i с учетом повторяемости опытов в эксперименте, $\bar{\eta}$ — среднее значение параметра отклика (кинематической вязкости) и $S_{\text{воспр}}^2$ — дисперсия воспроизводимости, вычисляемая по формуле

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^n (n_{ij} - \bar{\eta}_i)^2, \quad j=1 \dots n, \quad (4)$$

где N — общее число опытов; n — число параллельных (дублированных) опытов в i -х условиях.

Таблица 3
Результаты исследования

№ п/п	Факторы			η_1	η_2	$\bar{\eta}$	$S_{\text{воспр}}^2$	$\hat{\eta}$	$S_{\text{адекв}}^2$
	U, В	T, К	τ , мин						
1	6,0	323,0	60,0	73,15	73,51	73,33	0,6	73,1	0,7
2	0,0	293,0	60,0	75,89	75,83	75,86		75,9	
3	6,0	293,0	0,0	75,87	75,40	75,64		75,7	
4	6,0	293,0	60,0	72,06	71,16	71,61		71,6	
5	0,0	323,0	60,0	74,91	74,46	74,69		75,7	
6	0,0	323,0	0,0	76,05	75,58	75,80		76,5	
7	6,0	323,0	0,0	73,50	75,61	73,56		73,8	
8	0,0	293,0	0,0	75,79	76,05	75,92		75,3	

3. Составление математической модели кинематической вязкости рапсового масла.

Для составления математической модели воспользуемся неполным квадратным уравнением, так как нас интересуют эффекты взаимодействия:

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (5)$$

где \hat{y} — функция отклика, b_i — коэффициенты, отражающие индивидуальные факторы, b_{ij} — коэффициенты, отражающие двойное взаимодействие, b_{ijk} — коэффициенты, отражающие тройное взаимодействие.

Коэффициенты регрессии b находятся по формуле

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{\eta}_i, \quad j = 0 \dots k. \quad (6)$$

По результатам экспериментальных исследований для вязкости рапсового масла уравнение (5) имеет полиномиальный вид:

$$\hat{\eta} = 74,6 - 1,0x_1 - 0,2x_2 - 0,7x_3 + 0,1x_1x_2 + 0,3x_2x_3 - 0,4x_1x_3 + 0,6x_1x_2x_3. \quad (7)$$

4. Корректировка математической модели кинематической вязкости с учетом значимости возмущающих факторов.

Корректировка модели состоит в исключении незначимых факторов и эффектов их взаимодействия. Коэффициенты полинома (7) определяют степень их значимости. Для проверки оценки величины коэффициентов определим доверительный интервал Δb :

$$\Delta b = t_{0,95} \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N(n-1)}}, \quad (8)$$

где $t_{0,95}$ — критерий Стьюдента.

Значимость коэффициентов определяется из неравенства

$$|b| > \Delta b. \quad (9)$$

Табличное значение критерия Стьюдента составляет $t_{табл} = 2,31$ [3, с. 393].

Рассчитанный доверительный интервал (Δb) по формуле (8) составляет 0,3.

Проверка значимости коэффициентов регрессии полинома (7) показывает, что коэффициенты температуры $b_2 = 0,2$, двойного взаимодействия факторов напряжения и температуры $b_{12} = 0,1$, а также температуры и длительности $b_{23} = 0,3$ незначимые.

Тогда скорректированный полином математической модели вязкости рапсового масла имеет следующий вид:

$$\hat{\eta} = 74,6 - 1,0x_1 - 0,7x_3 - 0,4x_1x_3 + 0,6x_1x_2x_3. \quad (10)$$

Значения кинематической вязкости $\hat{\eta}$, вычисленные по полученной математической полиномиальной модели (10), представлены в таблице 3.

В результате проведенного статического анализа и корректировки математической модели выявлены значимые факторы и эффекты их совместного взаимодействия. Среди индивидуальных факторов значимыми являются напряжение ВЧ-поля ($b_1 = 1,0$) и длительность полевого воздействия ($b_3 = 0,7$), сочетание двух факторов напряжения и длительности ($b_{13} = 0,4$) и сочетание всех трех факторов ($b_{123} = 0,6$).

Из изложенного следует, что наибольшее влияние на кинематическую вязкость рапсового масла оказывает напряжение ВЧ-поля.

Физическая интерпретация знаков при коэффициентах в математической модели состоит в следующем. С молекулярной точки зрения существует общепринятое представление об ассоциатах в структуре жидкости. Действие электромагнитного поля ведет к активизации когерентного движения ассоциатов вследствие поглощения энергии ВЧ-поля, что снижает межмолекулярное взаимодействие на уровне ассоциатов и уменьшает вязкость. Снижение вязкости отражает отрицательный знак при коэффициентах в математической модели.

Часть поглощенной энергии ВЧ-поля идет на повышение хаотического движения молекул в ассоци-

атах и увеличивает вероятность перехода молекул из ассоциата в ассоциат. Это обстоятельство, предположительно, и свидетельствует о повышении вязкости жидкости, что объясняет положительный знак при тройном взаимодействии.

5. Проверка математической модели на адекватность.

Для проведения проверки на адекватность модели необходимо выяснить, как согласуются данные, полученные в результате эксперимента, с рассчитанными по полиномиальной модели (10). Критерием адекватности служит неравенство

$$F_{расч} < F_{табл}, \quad (11)$$

где $F_{расч}$, $F_{табл}$ — расчетное и табличное значения коэффициентов Фишера.

Расчетный коэффициент Фишера $F_{расч}$ находится:

$$F_{расч} = \frac{S_{воспр}^2}{S_{адекв}^2}, \quad (12)$$

где $S_{адекв}^2$ — дисперсия адекватности, которая определяется по формуле

$$S_{адекв}^2 = \frac{1}{N-r} \sum_{i=1}^N (\bar{\eta}_i - \hat{\eta}_i)^2, \quad (13)$$

где r — число значимых коэффициентов регрессии в полиноме (10).

Результат расчета дисперсии адекватности представлен в таблице 3. Расчетный коэффициент Фишера ($F_{расч}$) составляет 0,9, а табличное значение коэффициента Фишера $F_{табл}$ с учетом степеней свободы ($f_{воспр} = 8$, $f_{адекв} = 5$) 3,69 [3, с. 394].

По условию (11) модель адекватна.

Выводы

Оценка степени воздействия факторов ВЧ ЭМП и температуры рапсового масла на его кинематическую вязкость с помощью полного факторного эксперимента (2^3) свидетельствует об адекватности составленной статистической модели.

Наибольшее влияние на кинематическую вязкость рапсового масла оказывает напряжение ВЧ-поля.

Библиографический список

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М., 1976.
2. Лыков П. В., Дудкин В. И. Снижение гидравлических потерь в результате действия высокочастотного электро-

магнитного поля // Известия Алтайского государственного университета. — 2012. — № 1/2.

3. Гмурман Б. Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике. — М., 1979.