

*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/с<sup>2</sup>. 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;  $\Delta x_i$  — 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  $\Delta x_i$  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 2<sup>3</sup> 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 $\Delta x_i$	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	$\pm 15$	293	-1	323	+1
Длительность ( $x_3$ ), $\tau, \text{мин}$	30	$\pm 30$	0	-1	60	+1

Таблица 2  
Матрица планирования эксперимента 2<sup>3</sup>

№ 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  $\eta_1, \eta_2$  — 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			$\eta_1$	$\eta_2$	$\bar{\eta}$	$S_{\text{воспр}}^2$	$\hat{\eta}$	$S_{\text{адекват}}^2$
	U, В	T, К	$\tau$ , 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  $\Delta b$ :

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

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 ( $\Delta b$ ) 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.