УДК 621.431.74.03-57

Богач В.М.
ОНМА

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МАСЛОПОДАЧИ СИСТЕМОЙ СМАЗЫВАНИЯ ДЛИННОХОДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ WARTSILA

Экспериментальные исследования конструкций нагнетательного тракта систем смазывания цилиндров длинноходовых ДВС, позволили определить характеристики его элементов, влияющие на формирование процесса маслоподачи в цилиндр. К ним в первую очередь относятся геометрические характеристики маслоподводящего канала (рис.1).

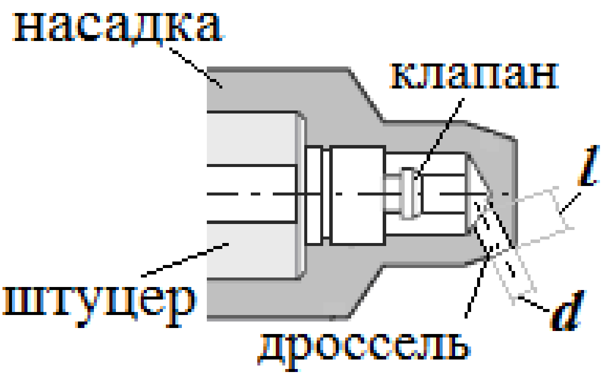


Рис. 1. Геометрия маслоподводящего канала

Для определения путей совершенствования систем смазывания, необходимо отыскание оптимального сочетания таких геометрических параметров, которые обеспечат эффективную работу системы смазывания. Эта задача решалась методом многофакторного эксперимента [6,50,52]. При этом в качестве оценочного показателя совершенства процесса маслоподачи, выбрано равномерность подачи масла по оборотам двигателя (в процентах).

Для записи плана эксперимента и обработки экспериментальных данных воспользуемся кодированными значениями факторов X_i, которые связаны с физическими переменными $\tilde{X}_i$ следующим соотношением:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{J_i} \qquad (1)$$

где: $\tilde{X}_i$ - текущее значение физической переменной; $\tilde{X}_{i0}$ - основной уровень физической величины фактора; J_i - физический интервал варьирования. На основании известных значений геометрических параметров маслоподводящего тракта, выбранных в качестве основных факторов (рис.1), были установлены границы их изменения. В этих границах, для каждого из факторов, выбраны основные, верхние и нижние уровни, а также интервалы их варьирования (табл.1).

Таблица 1. Уровни факторов и интервалы варьирования

№ п/п	Факторы	Уровни			Интервалы варьирования
		нижний	основной	верхний	
1	Длина канала дросселя - l (X_1)	2	3	4	1
2	Жесткость пружины аккумулятора - $g_{ак}$ (X_2)	4	5	6	1
3	Жесткость пружины клапана – $g_{кл}$ (X_3)	1	2	3	1
4	Диаметр канала дросселя – d (X_4)	1	1,5	2	0,5

С целью сокращения количества опытов, воспользуемся дробной репликой от полного факторного эксперимента. После рандомизации опытов получена матрица планирования (табл. 2), которая представляет собой полуреплику от 2^4, заданную генерирующим соотношением $X_4=X_1X_2X_3$, с определяющим контрастом - $1=X_1X_2X_3X_4$.

При проведении опытов, для каждого принятого в матрице сочетания факторов, измерялись значения отклика. Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, последовательность опытов выбиралась на основании таблицы случайных чисел, а уменьшение случайных погрешностей прямого измерения и получение наиболее достоверных результатов, обеспечено путем повторных измерений [64, 66].

Для функции отклика $Y(X_1X_2X_3X_4)$, по результатам эксперимента, можно построить уравнение регрессии в виде алгебраического полинома первого порядка

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_4+b_{12}X_{12}+$$
$$+b_{13}X_{13}+b_{23}X_{23}+b_{34}X_{34}+b_{24}X_{24}+b_{14}X_{14}, \qquad (2)$$

где: b_0, b_1,....., b_4 - коэффициенты уравнения.

Таблица 2. Матрица планирования и результаты экспериментов

№ опыта	Рандомизация	Кодовые обозначения переменных и их значения												Результаты наблюдений		
		X_0	X_1l		$X_2g_{ак}$		$X_3g_{кл}$		X_4d		$X_1X_2=X_3X_4$	$X_1X_3=X_2X_4$	$X_2X_3=X_1X_4$	$У_1$	$У_2$	$У_3$
1	9,14,10	+	+	4	+	6	-	1	-	1	+	-	-	71,5	74,5	73,6
2	18,8,12	+	-	2	-	4	-	1	-	1	+	+	+	83,2	83,2	84,5
3	11,17,2	+	+	4	-	4	-	1	+	2	-	-	+	85,3	87,8	84,6
4	15,23,1	+	-	2	+	6	-	1	+	2	-	+	-	80,8	84,6	81,8
5	5,22,3	+	+	4	+	6	+	3	+	2	+	+	+	73,3	75,4	74
6	21,4,24	+	-	2	-	4	+	3	+	2	+	-	-	84,8	87,6	86,3
7	20,7,13	+	+	4	-	4	+	3	-	1	-	+	-	97,9	97,8	98
8	6,16,19	+	-	2	+	6	+	3	-	1	-	-	+	87,7	86,2	85,8

Имея серию повторных опытов с дублированием *n=3*, найдем среднее арифметическое всех результатов

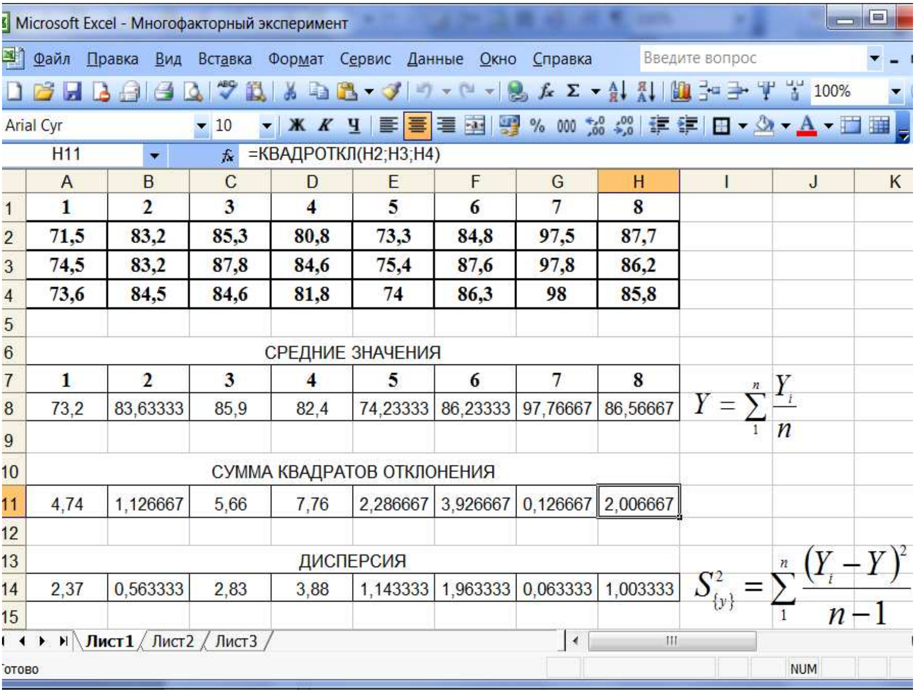
$$Y=\sum_{1}^{n}\frac{Y_i}{n} \qquad (3)$$

где: *Yi* - результат отдельного опыта, и проведем оценку построчной дисперсии, что в данном случае позволяет оценить дисперсию эксперимента с числом степеней свободы f_n = n-1, по формуле

$$S_{\{y\}}^{2}=\sum_{1}^{n}\frac{\left(Y_{i}-Y\right)^{2}}{n-1} \tag{4}$$

Расчет выполняем в среде MS EXCEL.

Полученные результаты измерений располагаем в электронной таблице Excel в столбцах *A-H* (рис.2). Оставив место на поясняющие подписи, вычислим соответствующие средние арифметические значения. Для этого в ячейку *A8* записываем (или вызываем встроенную функцию) =СРЗНАЧ(A2:A4) и протягиваем ее до ячейки *H8*.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	2	3	4	5	6	7	8			
2	71,5	83,2	85,3	80,8	73,3	84,8	97,5	87,7			
3	74,5	83,2	87,8	84,6	75,4	87,6	97,8	86,2			
4	73,6	84,5	84,6	81,8	74	86,3	98	85,8			
5											
6	СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ										
7	1	2	3	4	5	6	7	8	$Y=\sum_{1}^{n}\frac{Y_i}{n}$		
8	73,2	83,63333	85,9	82,4	74,23333	86,23333	97,76667	86,56667			
9											
10	СУММА КВАДРАТОВ ОТКЛОНЕНИЯ										
11	4,74	1,126667	5,66	7,76	2,286667	3,926667	0,126667	2,006667			
12											
13	ДИСПЕРСИЯ										
14	2,37	0,563333	2,83	3,88	1,143333	1,963333	0,063333	1,003333	$S_{\{y\}}^{2}=\sum_{1}^{n}\frac{(Y_i-Y)^2}{n-1}$		
15											

Рис. 2. Расчет средних значений, сумм квадратов и дисперсии

Для расчета среднеквадратичного отклонения каждой из измеренных величин необходимо просуммировать квадраты разности между каждым измеренным значением и средним арифметическим. Воспользуемся для этого встроенной функцией КВАДРОТКЛ. В ячейке *A11* запишем: =КВАДРОТКЛ(A2:A4). Для расчета дисперсии разделим содержимое ячейки *A14* на *n-1*, (записав =A14/2) и протягиваем ее до ячейки *H8*.

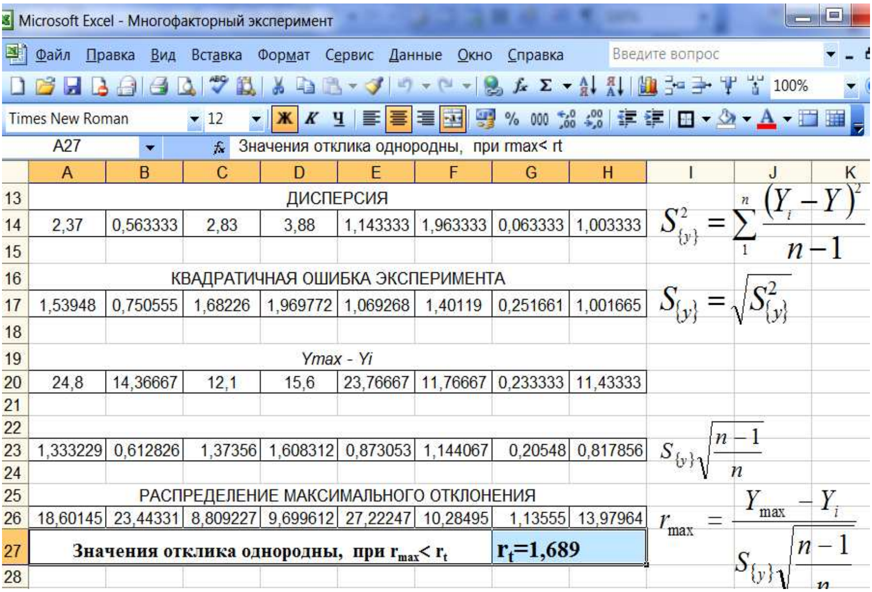
Для исключения из экспериментальных данных грубых ошибок, воспользуемся распределением максимального отклонения (рис. 3).

$$r_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_i}{S_{\{y\}}\sqrt{\frac{n-1}{n}}} \tag{5}$$

где Y_{max}- наибольшее значение отклика;

$S_{\{y\}} = \sqrt{S^2_{\{y\}}}$ - квадратичная ошибка эксперимента.

Значения отклика однородны, если $r_{max} < r_t$, где r_t - табличное значение распределения, при уровне значимости α = 0,05 и числе степеней свободы f_y=n-1.



Microsoft Excel - Многофакторный эксперимент

A27 Значения отклика однородны, при rmax< rt

	A	B	C	D	E	F	G	H	I–K
13	ДИСПЕРСИЯ								$S^2_{\{y\}} = \sum_1^n \frac{(Y_i - Y)^2}{n-1}$
14	2,37	0,563333	2,83	3,88	1,143333	1,963333	0,063333	1,003333	
15									
16	КВАДРАТИЧНАЯ ОШИБКА ЭКСПЕРИМЕНТА								
17	1,53948	0,750555	1,68226	1,969772	1,069268	1,40119	0,251661	1,001665	$S_{\{y\}} = \sqrt{S^2_{\{y\}}}$
18									
19	Ymax - Yi								
20	24,8	14,36667	12,1	15,6	23,76667	11,76667	0,233333	11,43333	
21									
22									
23	1,333229	0,612826	1,37356	1,608312	0,873053	1,144067	0,20548	0,817856	$S_{\{y\}}\sqrt{\frac{n-1}{n}}$
24									
25	РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ								
26	18,60145	23,44331	8,809227	9,699612	27,22247	10,28495	1,13555	13,97964	$r_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_i}{S_{\{y\}}\sqrt{\frac{n-1}{n}}}$
27	**Значения отклика однородны, при $r_{max} < r_t$**						**r_t=1,689**		
28									

Рис. 3. Расчет квадратичной ошибки и распределения максимального отклонения

Для проверки однородности дисперсии воспользуемся критерием Кохрена, который представляет собой отношение максимальной дисперсии S^2_{max} к сумме всех дисперсий (рис. 4).

$$G_p = \frac{S^2_{\max}}{\sum_1^n S^2_{\{y\}}} \tag{6}$$

дисперсии однородны, если $G_p < G_t$,

где G_t- табличное значение критерия Кохрена, при уровне значимости α=0,05 и степенях свободы $f=n-1$. При одинаковом числе параллельных опытов во всех точках плана, дисперсия воспроизводимости определяется по выражению

$$S^2_y = \frac{1}{N}\sum_1^N S^2_{\{y\}} \tag{7}$$

где N - общее число опытов.

Значимость различий 2-х средних проверим по критерию Стьюдента

$$t_{p1} = \frac{Y_{i\max} - Y_{i\min}}{S_y\sqrt{\frac{1}{n_{\max}} - \frac{1}{n_{\min}}}} \tag{8}$$

где $S_y = \sqrt{S^2_{\{y\}}}$ - погрешность воспроизводимости.

Различия между значениями отклика в различных точках плана существенно, если $t_{p1} > t_{t1}$,

где t_{t1} - табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости α = 0,05 и степенях свободы $f_y = n_{max} + n_{min}$.

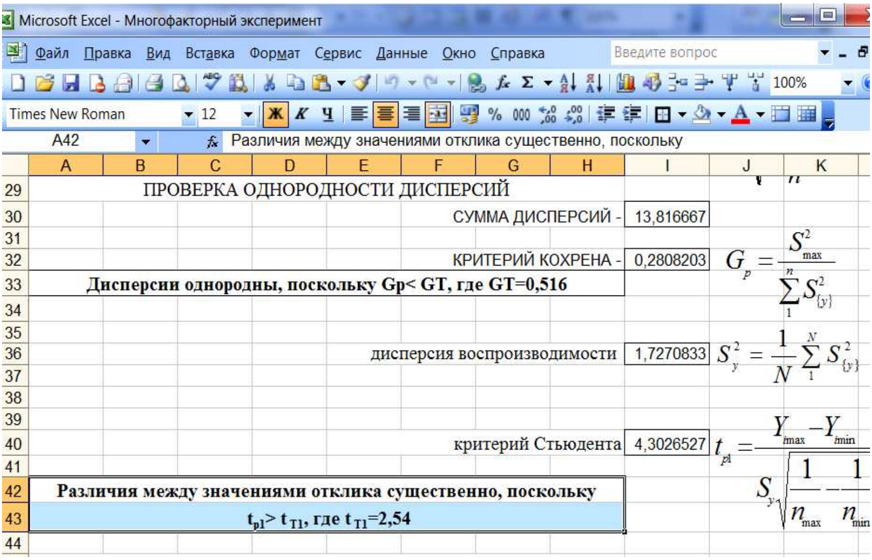


Рис. 4. Проверка однородности дисперсий

При вычислении коэффициентов выбранной модели (рис.5). используем формулу

$$b_i = \frac{1}{N}\sum_{1}^{N} Y_i X_i \qquad (9)$$

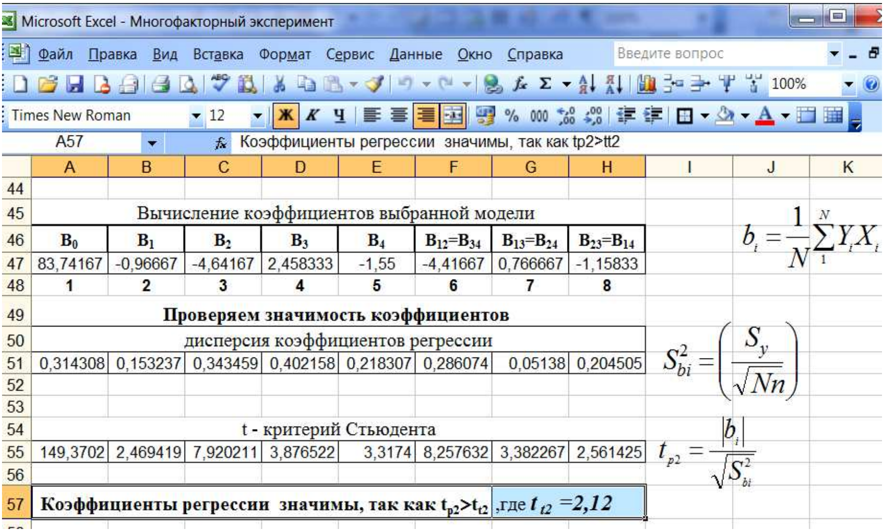
значимость коэффициентов проверяем по t - критерию Стьюдента

$$t_{p2} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S_{bi}^2}} \qquad (10)$$

где $S_{bi}^2 = \left(\frac{S_y}{\sqrt{Nn}}\right)$ - дисперсия коэффициентов регрессии.

Коэффициенты регрессии считаются значимыми, если $t_{p2} > t_{t2}$,

где: t_{t2} - табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и степенях свободы $f_y = N(n-1)$.



	A	B	C	D	E	F	G	H
45	Вычисление коэффициентов выбранной модели							
46	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	$B_{12}=B_{34}$	$B_{13}=B_{24}$	$B_{23}=B_{14}$
47	83,74167	-0,96667	-4,64167	2,458333	-1,55	-4,41667	0,766667	-1,15833
48	1	2	3	4	5	6	7	8
49	Проверяем значимость коэффициентов							
50	дисперсия коэффициентов регрессии							
51	0,314308	0,153237	0,343459	0,402158	0,218307	0,286074	0,05138	0,204505
54	t - критерий Стьюдента							
55	149,3702	2,469419	7,920211	3,876522	3,3174	8,257632	3,382267	2,561425
57	Коэффициенты регрессии значимы, так как $t_{p2}>t_{t2}$					,где t_{t2} =2,12		

$$b_i=\frac{1}{N}\sum_1^N Y_iX_i$$

$$S_{bi}^2=\left(\frac{S_y}{\sqrt{Nn}}\right)$$

$$t_{p2}=\frac{|b_i|}{\sqrt{S_{bi}^2}}$$

Рис.5. Вычисление коэффициентов выбранной модели и проверка их значимости

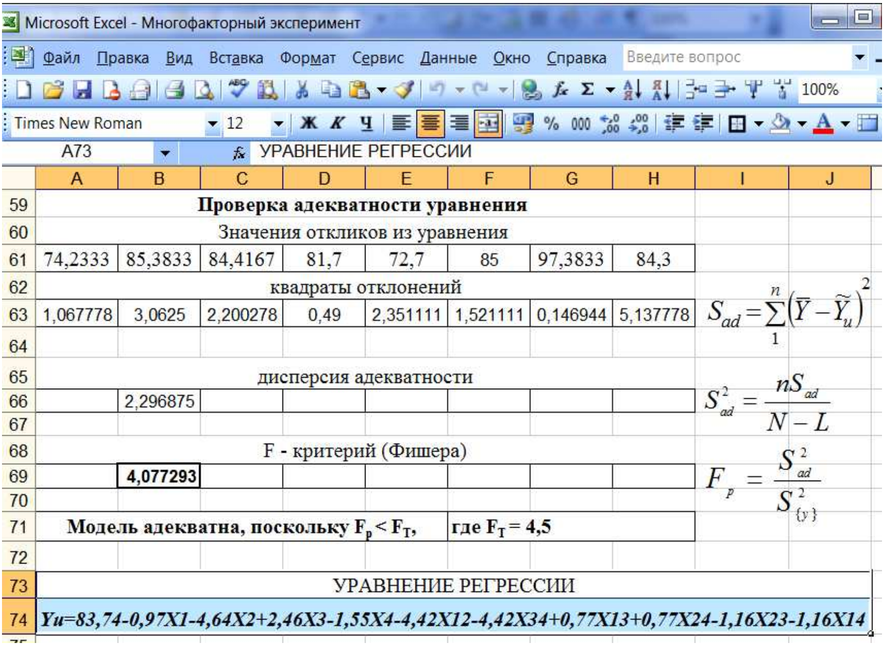
После подсчета коэффициентов регрессии и проверки их значимости из уравнения (2) получим уравнение регрессии $\tilde{Y}_u$. Проверка адекватности уравнения $\tilde{Y}_u$ опытным данным проведена по F - критерию (Фишера)

$$F_p=\frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2} \qquad (11)$$

где S_{ad}^2 - дисперсия адекватности; $S_{\{y\}}^2$ - дисперсия параметра оптимизации. Оценка дисперсии адекватности производилась по формуле

$$S_{ad}^2=\frac{nS_{ad}}{N-L} \qquad (12)$$

где $S_{ad}=\sum_1^n\left(\bar{Y}-\tilde{Y}_u\right)^2$ - сумма квадратов отклонений средних значений откликов от предсказуемых уравнением регрессии; L - число статистических значимых коэффициентов регрессии.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I–J
59	**Проверка адекватности уравнения**								
60	Значения откликов из уравнения								
61	74,2333	85,3833	84,4167	81,7	72,7	85	97,3833	84,3	
62	квадраты отклонений								
63	1,067778	3,0625	2,200278	0,49	2,351111	1,521111	0,146944	5,137778	$S_{ad} = \sum_{1}^{n} \left(\bar{Y} - \tilde{Y}_u\right)^2$
64									
65	дисперсия адекватности								
66		2,296875							$S_{ad}^2 = \dfrac{nS_{ad}}{N-L}$
67									
68	F - критерий (Фишера)								
69		**4,077293**							$F_p = \dfrac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2}$
70									
71	**Модель адекватна, поскольку $F_p < F_T$,**					**где $F_T = 4,5$**			
72									
73	УРАВНЕНИЕ РЕГРЕССИИ								
74	***Yu=83,74-0,97X1-4,64X2+2,46X3-1,55X4-4,42X12-4,42X34+0,77X13+0,77X24-1,16X23-1,16X14***								

Рис. 6. Проверка адекватности модели

Если $F_p < F_t$, (F_t - табличная величина критерия, при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и степенях свободы $f_{y1} = N\text{-}L$, $f_{y2} = N(n-1)$, то можно утверждать, что уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента (рис. 6) и гипотеза об адекватности модели принимается.

В результате обработки опытных данных получена математическая модель [43,68,69] - уравнение регрессии в кодированных безразмерных значениях факторов равномерности поступления масла по оборотам двигателя:

$$Yu = 83{,}74 - 0{,}97X_1 - 4{,}64X_2 + 2{,}46X_3 - 1{,}55X_4 - 4{,}42X_{12} - 4{,}42X_{34} + 0{,}77X_{13} + 0{,}77X_{24} - 1{,}16X_{23} - 1{,}16X_{14} \tag{13}$$

Полученное уравнение регрессии, используя равенство (2), представим в безразмерной форме натуральной величины равномерности поступления масла по оборотам двигателя

$$R = 83{,}74 - 0{,}97l - 4{,}64g_{ак} + 2{,}46\, g_{кл} - 1{,}55d - 4{,}42\, l\, g_{ак} - 4{,}42\, g_{кл}\, d + 0{,}77\, l\, g_{кл} + 0{,}77\, g_{ак}\, d - 1{,}16\, g_{ак} g_{кл} - 1{,}16\, l\, d \quad (14)$$

Располагая адекватной линейной моделью, предпримем движение по градиенту, с целью отыскания оптимальной геометрии заклапанной полости, обеспечивающей поступление всего масла непосредственно на зеркало цилиндра.

Рассчитываем составляющие градиента из выражения: ***bi Ji***,

где ***bi*** - коэффициент i-го фактора; ***Ji*** - интервал варьирования.

Выбираем шаг и проводим мысленные опыты (табл.5.3), последовательно прибавляя значения шагов к основным уровням факторов.

При адекватной модели, реализацию мысленных опытов начинают с тех, которые, хотя бы по одному из факторов, выходят за область эксперимента. В нашем случае к таким опытам относятся № 15 - в которых по фактору X_3, X_4 (жесткости пружин аккумулятора и клапана одинаковы). При таких условия истечение масла приостанавливается.

Указанные опыты реализованы на стенде, при этом получено оптимальное значение отклика, т.е. найдены условия, при которых осуществляется равномерное истечение масла (одинаковое количество масла на каждом обороте двигателя) из канала штуцера. Следовательно, крутое восхождение эффективно и область оптимума достигнута.

В результате проведения многофакторного эксперимента определено, что оптимальными геометрическими параметрами нагнетательного тракта системы цилиндровой смазки, оказывающими основное влияние на качество процесса маслоподачи, являются длинна канала дросселя l = 2,5-2,6 мм; жесткость пружины клапана gкл = =2,6-2,7 кГ; диаметр канала дросселя d =1,2-1,25 мм и жесткость пружины аккумулятора gак = 2,9-3,0 кГ.

Таблица 3. Расчет крутого восхождения

Фактор	X_1 (l, мм)	X_2 ($g_{ак}$, кГ)	X_3 ($g_{кл}$, кГ)	X_4 (d, мм)
Основной уровень	3	5	2	1,5
b_i	-0,96667	-4,64167	2,458333	-1,55
$b_i J_i$	-0,96667	-4,64167	2,458333	-0,755
Шаг (:30)	-0,025	-0,15	0,05	-0,02
Опыты				
1	2,975	4,85	2,05	1,48
2	2,950	4,70	2,10	1,46
3	2,925	4,55	2,15	1,44
4	2,900	4,40	2,20	1,42
5	2,875	4,25	2,25	1,40
6	2,850	4,10	2,30	1,38
7	2,825	3,95	2,35	1,36
8	2,700	3,80	2,40	1,34
9	2,675	3,65	2,45	1,32
10	2,650	3,50	2,50	1,30
11	2,625	3,35	2,55	1,28
12	2,600	3,20	2,60	1,26
13	2,575	3,05	2,65	1,24
14	2,550	2,90	2,70	1,20
15	2,525	2,75	2,75	1,18