УДК 625.768.5.08

ПЛАНИРОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ВИБРАЦИОННЫЙ ГИДРОШИННЫЙ КАТОК – УПЛОТНЕНИЕ СНЕЖНОЙ МАССЫ»

Плохов А.А., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М., Мерданов Ш.М.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: tts@tsogu.ru

В статье произведен выбор параметров, влияющих на уплотнение снежной массы, а также произведен расчет влияния факторов, которые были определены методом неполноблочных планов, в ходе которого выявлены наиболее значимые: частота и амплитуда вибрационного уплотняющего воздействия, масса и количество проходов гидрошинного катка. Для уменьшения влияния случайных ошибок работа выполнялась в одно время суток и одним исследователем. Подсчет несущей способности уплотненного дорожного основания производился путем взятия керна из уплотненной за один проход снежной массы и взвешивания его на электронных весах и замера рулеткой высоты керна. После расчетов коэффициентов регрессии была сформирована матрица планирования предварительного эксперимента, по которой выполнено натурное исследование. Результаты предварительного эксперимента необходимы для подтверждения выбора функции регрессии. Проверка адекватности математической модели выполнена при помощи коэффициента Фишера. Проверка однородности дисперсии выполнена по критерию Кохрена. Математическое описание функции отклика уравнение регрессии адекватно.

Ключевые слова: гидрошинный каток, вибрация, количество проходов, временная зимняя дорога, экспертная оценка

PLANNING MULTIFACTORIAL EXPERIMENT «VIBRATION HYDRO-SEAL TYRE ROLLER SNOW MASS»

Plokhov A.A., Kostyrchenko V.A., Madyarov T.M., Merdanov Sh.M.

Tyumen Industrial University, Tyumen, e-mail: tts@tsogu.ru

The article made the choice of the parameters affecting the seal of the snow mass, and calculated the impact of the factors that have been identified by nepolnoblochnyh plans in which identified the most significant: the frequency and amplitude of the vibration of the sealing effects, weight and number of passes gidroshinnogo rink. To reduce the effect of random errors work was carried out at the same time and one investigator. Calculation of bearing capacity of the compacted road base was carried out by taking a core sample of compacted snow in a single pass weight and weighing it on an electronic scale with a tape measure and measure the height of the core. After the calculation of the regression coefficients of the matrix prior experimental design was formed, on which full-scale studies performed. preliminary experimental results are needed to confirm the regression function. Check the adequacy of the mathematical model is made using Fisher's coefficient. Checking the homogeneity of variance performed by Cochran's criterion. The mathematical description of the regression equation of the response function adequately.

Keywords: gidrotires rink, vibration, the number of passes, the temporary winter road, peer review

Многолетний опыт разработки газовых и газоконденсатных месторождений нефтегазоносной области России требует научного обобщения и интерпретации с целью не повторения ошибок при освоении новых площадей. Главными проблемами при разработке залежей являются геологические, технологические и технические причины.

К геологическим причинам относят геологическое строение продуктивных отложений, осложненное разломами (трещинами) и тектоническими нарушениями, повышенное содержание солей, парафина, серы и т.д., физико-химический состав флюида и т.д.

К технологическим причинам относят затруднения по организации нефтегазосборной сети, системы заводнения залежи, работы промысловых бригад и специалистов, контроля за разработкой углеводородов и т.д.

К техническим причинам относят сложность организации инфраструктуры нефтегазодобывающего промысла (проведение дорог, водо- и электроснабжения, нефте/газопровода и т.д.), в условиях болотистой или плохо проходимой местности и сложнейших климатических условий.

Хотелось бы отметить, что именно технические проблемы первыми затормаживают организацию процесса добычи углеводородов как отложенного механизма.

Необходимость освоения новых месторождений газа, формирование соответствующей инфраструктуры при сложных географических, геологических и природно-климатических условиях добычи, а также увеличение дальности пригодных транспортных развязок будут негативно сказываться на экономических показателях работы предприятий по добыче и транспортировке нефти и газа.

Одним из способов сократить экономические затраты на разработку новых месторождений, отдаленных от уже имеющихся

населенных пунктов севера Ямало-Ненецкого автономного округа, является использование существующих естественных условий окружающей природы в качестве основы для прокладки качественного и стойкого (достаточно долговечного) дорожного полотна. Такими дорогами являются насыпные, снеголедяные дорожные покрытия и зимники.

Механизация строительства зимних дорог может развиваться по двум направлениям. Первое из них основано на применении специализированных машин, выполняющих одновременно (по совмещенной технологии) перемешивание и увлажнение снега, его уплотнение и рифление покрытия дорожного полотна. Второе направление состоит в использовании универсальных машин и простого навесного или прицепного оборудования, выполняющего технологические операции последовательно (по расчленённой технологии).

Остальные факторы зафиксированы: ширина уплотняемого снежного покрова – $S = 570$ мм; начальная толщина снежного слоя – $h = 420$ мм; начальная плотность снежной массы – $r = 287$ кг/м^2; погодные условия: температура окружающей среды $T = 0$ °С, атмосферное давление $p = 737$ мм рт.ст., влажность воздуха – 53 %, скорость ветра $V_{ветр} = 2$ м/с, направление ветра – юго-западное.

После проведения выбора параметров, влияющих на уплотнение снежной массы был произведен расчет влияния факторов, которые были определены методом неполноблочных планов [14] в ходе которого было выявлены наиболее значимые: частота и амплитуда вибрационного уплотняющего воздействия, масса и количество проходов гидрошинного катка. Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения уровней и интервалов варьирования факторов

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	–1	0	+1	
Количество проходов установки *n,* ед.	1	2	3	1
Масса установки – x_2, кг	420	500	580	80
Частота колебаний вибратора – x_3 Гц	20	35	50	15

Специализированные машины, работающие по совмещенной технологии, не позволяют строить зимние дороги в насыпи. Для собирания снега с дорожной полосы при сооружении насыпи требуются отдельные машины – снегоочистители. Недостатком специализированных машин является также их непригодность для эксплуатационного обслуживания зимних дорог. По этим причинам общепризнаны преимущества расчлененной технологии сооружения зимних дорог и ледовых переправ.

Расчлененная (пооперационная) технология сооружения зимней дороги включает в себя различный набор операций в зависимости от конструкции полотна дороги и принятого способа его строительства.

Для эффективного уплотнения снежной массы нужно произвести поиск и выявить факторы, влияющие на этот процесс. Из анализа литературных источников и по результатам экспериментов предыдущих исследований, проводимых А.В. Шарухой, А.Л. Егоровым, Ш.М. Мердановым и др. [1–9], выделены для дальнейшего исследования следующие факторы: количество проходов установки n, ед.; масса установки – m, кг; частота колебаний вибратора – v, Гц.

Изменение частоты колебаний вибратора обеспечивалось путем использования частотного преобразователя – iG5. Скорость движения установки регулировалась путем запасовки канатов через блоки, для увеличения тягового усилия лебедки. Масса установки регулировалась за счет нагружения или снятия дополнительного груза (мешки с песком по 40 кг).

Для уменьшения влияния случайных ошибок работа выполнялась в одно время суток и одним исследователем. Подсчет несущей способности уплотненного дорожного основания производился путем взятия керна из уплотненной за один проход снежной массы [10–13] и взвешивания его на электронных весах и замера рулеткой высоты керна. Для вычисления использовалась программа Microsoft Excel, Regress, Statistics 10. Число повторных опытов – 3.

Число возможных опытов определяют по выражению

$$N = p^k, \qquad (1)$$

где N – число опытов; p – число уровней; k – число факторов.

Был произведен эксперимент типа $N = 2^3$, где число факторов $k = 3$, число

уровней $p = 2$, число опытов $N = 8$, число повторных опытов $n = 3$.

Обычно оптимизируется одна функция, наиболее важная с точки зрения исследования, при ограничениях, налагаемых другими функциями. Поэтому из многих выходных параметров выбирается один в качестве параметра оптимизации, а остальные служат ограничениями. Всегда полезно исследовать возможность уменьшения числа выходных параметров. Для этого можно воспользоваться корреляционным анализом.

Полином второй степени в общем виде имеет вид

$$y = b_0 + Sb_i X_i + Sb_{ij} X_{ij}^2. \quad (2)$$

Уравнение регрессии $N = 2^3$, по которому была сформирована матрица планирования эксперимента, представленная в табл. 2.

После проведения опытов была выполнена статистическая обработка результатов. Определим ошибки повторных (параллельных) опытов.

Среднеквадратичное отклонение определяем по выражению

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^N \left(y_j^э - y_j^p \right)^2}{n-1}. \quad (3)$$

Данные расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента $N = 2^3$

№ п/п	Матрица планирования															Рабочая матрица			Результаты параллельных экспериментов y_1, y_2, y_3	$\overline{y}$
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1^2x_2^2$	$x_1^2x_3^2$	$x_2^2x_3^2$	$x_1^2x_2^2x_3^2$	Количество проходов установки x_1, ед.	Масса установки – x_2, кг	Частота колебаний вибратора – x_3, Гц		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	1	–1	1	1	1	–1	–1	1	–1	1	1	1	–1	1	1	3	580	20	339,3	
																			339,3	334,6
																			325,2	
2	–1	–1	–1	–1	1	1	–1	1	–1	1	–1	1	–1	–1	1	1	580	20	396,3	
																			395,8	395,8
																			395,2	
3	1	1	–1	1	–1	1	1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	1	3	420	20	354,5	
																			354,5	356,4
																			360,2	
4	–1	–1	–1	1	1	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	1	1	1	420	20	316,0	
																			322,3	318,1
																			316,0	
5	1	1	1	1	–1	1	1	–1	–1	1	–1	1	–1	1	1	1	420	50	332,9	
																			328,9	333,7
																			339,3	
6	–1	–1	–1	1	1	1	1	–1	–1	1	1	1	1	1	–1	1	580	50	367,7	
																			390,2	380,2
																			382,7	
7	1	1	1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	1	–1	1	1	–1	3	420	50	398,1	
																			391,2	395,8
																			398,1	
8	–1	1	1	1	1	1	–1	1	–1	–1	–1	–1	1	1	–1	3	580	50	426,3	
																			428,3	428,7
																			431,6	

Таблица 3

Данные расчетов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	66,61	0,31	10,91	13,32	27,71	131,43	16,12	7,32
S_i	8,16	0,54	3,30	3,64	5,26	11,46	4,01	2,07

Таблица 4

Определение брака при повторных опытах

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{\text{расч.мин}}$	–1,16	–0,91	–0,58	–0,58	–0,92	–1,09	–1,16	–0,9
$t_{\text{расч.макс}}$	0,58	–1,03	1,16	1,16	1,07	0,87	0,58	1,07
$t_{\text{табл}}$	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3

Для определения брака используем критерий Стьюдента:

$$\frac{y-\mathbf{y}}{s} \geq t \quad \text{или} \quad t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}},$$

где t – критерий Стьюдента, его значение для 3 повторных опытов и доверительной вероятности 0,95 равно 4,3. Данные расчетов приведены в табл. 4.

Условие $t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}}$ не выполняется. Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}\left(y_j^э - y_j^p\right)^2. \qquad (4)$$

Из расчета получаем $S_y^2 = 280{,}92$.

Проверка однородности дисперсий выполняется по критерию Кохрена по формуле

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_i^2}; \qquad (5)$$

$$G = \frac{131{,}43}{280{,}92} = 0{,}47.$$

Для нахождения табличного значения $G_{\text{таб}}$ определяем N и f:

$$N = 8; \quad f = 3 - 1 = 2; \quad G_{\text{таб}} = 0{,}515.$$

Условие $G_{\text{р}} \leq G_{\text{таб}}$ выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

Уравнение математической модели (полином 2 степени) с учетом парных взаимодействий имеет вид

$$y = b_0 + b_1X_i + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 +$$
$$+b_{11}X_i^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{1122}X_1^2X_2^2 + b_{1133}X_1^2X_3^2 + b_{2233}X_2^2X_3^2 + b_{112233}X_1^2X_2^2X_3^2.$$

Вычисляем коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте по формуле

$$b_i = \frac{\sum x_i\tilde{y}}{N}; \qquad (6)$$

$b_0 = –12{,}77$; $b_1 = –1{,}37$; $b_2 = –16{,}67$; $b_3 = 288{,}41$; $b_{12} = 96{,}43$; $b_{13} = 96{,}22$; $b_{23} = 20{,}57$; $b_{123} = –10{,}72$; $b_{11} = –367{,}93$; $b_{22} = –14{,}13$; $b_{33} = –87{,}98$; $b_{1122} = –14{,}15$; $b_{1133} = –76{,}58$; $b_{2233} = 189{,}45$; $b_{112233} = 61{,}66$.

С учетом значения дисперсии воспроизводимости $S_y^2 = 280{,}92$ с доверительной вероятностью a = 0,95 находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии:

$$bi = \pm\frac{t \cdot S_y}{\sqrt{N}} = \pm 25{,}4. \qquad (7)$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов видим, что коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_{123}, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{1122}, b_{1133} незначимы. Теперь уравнение математической модели имеет вид

$$y = 288{,}41X_3 + 96{,}43X_1X_2 + 96{,}22X_1X_3 + 20{,}57X_2X_3 + 189{,}45X_2^2X_3^2 + 61{,}66X_1^2X_2^2X_3^2.$$

Таблица 5

Результаты расчетов

Параметр	Номер серии опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Сумма по всем сериям
$\overline{y} = y^э$	334,6	395,8	356,4	318,1	333,7	380,2	395,8	428,7	2943
y_j^p	338,4	386,8	352,1	310,2	340,1	379,1	401,5	419,4	–
$y_j^э - y_j^р$	–3,8	9	4,3	7,9	–6,4	1,1	–5,7	9,3	15,8
$\left(y_j^э - y_j^р\right)^2$	14,2	80,1	18,6	62,4	40,6	1,3	32,2	86,7	336,1

Адекватность полученного уравнения проверяется путем вычисления теоретического значения параметра оптимизации $y^р$, величины ошибки $\Delta y = y^э - y^р$, результаты занесены в табл. 5.

Проверку адекватности математической модели выполняют при помощи коэффициента Фишера.

$$S_{ад}^{2э} = \frac{1}{N-B}\sum_{j=1}^{N}\left(y_j - y_j^p\right)^2; \qquad (8)$$

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{2}\ 336{,}1 = 168{,}05;$$

$$F_р = \frac{S_{ад}^2}{S_b^2}; \qquad (9)$$

$$F_p = \frac{168{,}05}{280{,}92} = 0{,}59.$$

Определим число степеней свободы, $d.f1 = 2$ и $d.f2 = 16$. Выбираем уровень значимости $\alpha = 0{,}95$. По значениям $d.f1 = 2$ и $d.f\,2 = 16$ находим критическое значение $F_т = 3{,}634$.

Так как $F_р \le F_т$, то математическое описание функции отклика уравнение регрессии считается адекватным.

Следующим этапом после планирования эксперимента является повторное проведение опытных исследований для уточнения и подтверждения гипотезы исследования.

Список литературы

1. Колунина В.А., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Приоритеты развития наземных транспортно-технологических комплексов в освоении континентального шельфа // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства Материалы Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 147–149.

2. Карнаухов Н.Н., Мерданов Ш.М., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Уплотняющая машина с дополнительным рабочим органом // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9–2. – С. 236–239.

3. Колунина В.А., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Проектирование машины для содержания и ремонта временных зимних дорог на базе снеготопотохода «СТРАННИК» // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2015. – С. 150–153.

4. Костырченко В.А., Мадьяров Т.М., Мерданов Ш.М. Основные аспекты развития транспортной инфраструктуры крайнего севера // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 3–1. – С. 31–36.

5. Мадьяров Т.М., Мерданов Ш.М., Костырченко В.А. Устройство для ремонта автозимников // Интерстроймех 2014: материалы Международной научно-технической конференции. – Самара, 2014. – С. 229–232.

6. Мадьяров Т.М., Костырченко В.А., Серебренников А.А., Мерданов Ш.М. Многофункциональный термоагрегат для увлажнения снежной массы // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9–2. – С. 278–281.

7. Мерданов Ш.М., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Анализ технологий строительства снеголедовых дорог при помощи вибрационных машин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2–2. – С. 281–285.

8. Мерданов Ш.М., Костырченко В.А. Анализ технологий сооружения автозимников на болотистых основаниях // Проблемы эксплуатации систем транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Тюменский государственный нефтегазовый университет, Институт транспорта. – 2009. – С. 203–205.

9. Мерданов М.Ш., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Проектирование вибрационного катка для строительства временной зимней дороги // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2015. – С. 207–209.

10. Мерданов Ш.М., Иванов А.А., Смолин Н.И., Иванов А.А., Обухов А.Г., Костырченко В.А., Мерданова М.Р. Вибрационный каток // Патент РФ № 2439240, 2010.

11. Мерданов Ш.М., Карнаухов Н.Н., Иванов А.А., Мадьяров Т.М., Иванов А.А., Мерданов М.Ш. Устройство для ремонта автозимников // Патент России № 2530966, 2013.

12. Обухов А.Г., Мерданов Ш.М., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М., Самоходный скрепер со снегоуплотняющим агрегатом // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 30. – № 2. – С. 58.

13. Серебренников А.А., Мерданов Ш.М., Мадьяров Т.М., Костырченко В.А. Прицепной агрегат для уплотнения дорожных насыпей // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9–2. – С. 304–308.

14. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.