УДК 630*332.2.001.57

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫКОПКИ САЖЕНЦЕВ С КОМОМ ПОЧВЫ ВЫКОПОЧНОЙ МАШИНОЙ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Дручинин Д.Ю.

ФГБОУ ВПО Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж
Россия (394087 г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8) vglta@vglta.vrn.ru

Для механизации перспективного способа лесовосстановления, озеленения городских территорий и создания ландшафтных дизайнов – создания лесных культур и городских насаждений крупномерньми саженцами, пересаживаемыми с комом почвы, разработана машина для выкопки крупномерных саженцев с комом почвы и подготовки посадочных ям. Анализ исследуемого процесса проведен на основании планирования многофакторного эксперимента. Для проведения лабораторных исследований разработана методика исследуемого процесса и опытный образец. Для изучения отобраны два фактора – твердость и влажность почвы. Опытным путем получены экспериментальные зависимости давления рабочей жидкости от твердости почвы и ее влажности. Рассчитана математическая модель исследуемого процесса в виде уравнения линейной регрессии. Проведена оптимизация исследуемых факторов по критерию минимального давления рабочей жидкости и качественного формирования кома.

Ключевые слова: выкопочная машина, ком почвы, саженцы, эксперимент, влажность почвы, твердость почвы, оптимизация.

OPTIMIZATION OF PLANTLETS LIFTING PROCESS FROM SOIL CLOD OF PLANT LIFTER ON THE BASIS OF MULTIFACTORIAL EXPERIMENT

Druchinin D.U.

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Russia (394 087 Voronezh, Timiryazeva str., 8) vglta@vglta.vrn.ru

For mechanization of a perspective reforestation way, gardening of city territories and creation landscaping – forest plantations creations and city plantings heavy plantlets replaced with soil clod, develop the car for heavy plantlets lifting with soil clod and preparation of landing holes. The analysis of research process is spent on the basis of planning of multiple-factor experiment. The technique of investigated process and a pre-production model is developed for carrying out of laboratory researches. For studying two factors – soil hardness and humidity are selected. Experimental dependences of pressure of a working liquid on hardness of soil and its humidity are by practical consideration received. The mathematical model of investigated process in the form of the equation of linear regress is calculated. Optimization of investigated factors by criterion of the minimum pressure of a working liquid and qualitative formation of a clod is spent.

Key words: plant lifter, soil clod, plantlets, experiment, soil moisture, soil hardness, optimization.

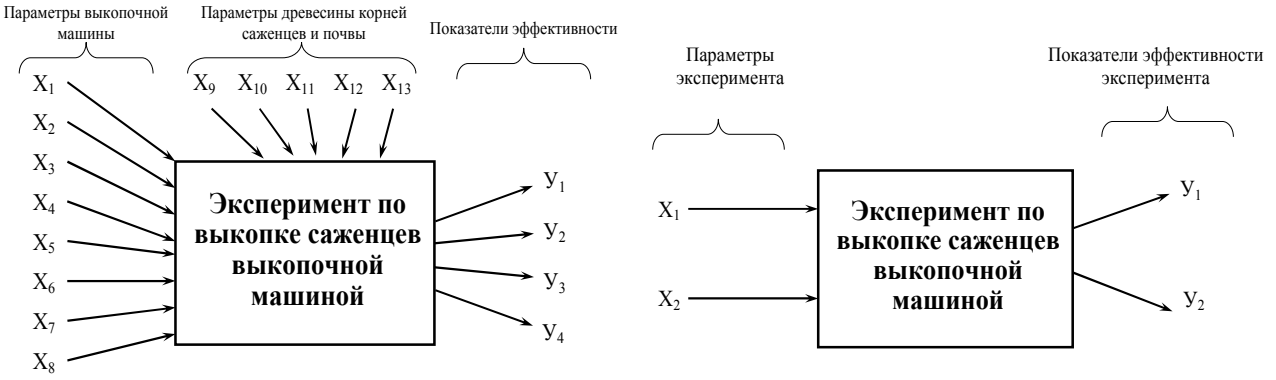
Введение. Для механизации перспективного способа лесовосстановления, озеленения городских территорий и создания различных ландшафтных дизайнов – создания лесных культур и городских насаждений крупномерными саженцами, пересаживаемыми с комом почвы, учеными Воронежской государственной лесотехнической академии разработана машина для выкопки крупномерного посадочного материала с комом почвы и подготовки посадочных ям [1].

Постановка задачи и ее решение. Анализ и оптимизация процесса выкопки саженцев с комом почвы разработанным агрегатом по критерию минимальных энергозатрат осуществлялась с

помощью метода планирования полнофакторного эксперимента (ПФЭ). Разработанная методика эксперимента обеспечивает простоту и точность задания каждого из факторов на необходимом значении [2, 3, 4, 5].

При предварительном изучении процесса проводили априорное ранжирование факторов, которые в дальнейшем разделили на группы. Взаимосвязь входных параметров и выходных характеристик лабораторного эксперимента можно представить схематически следующим образом (рис. 1, а). На схеме выделены три группы переменных, характеризующих эксперимент. Первая группа "Параметры выкопочной машины" представляет собой совокупность конструктивных и технологических параметров выкопочного агрегата: X_1 – угол заточки ножей рабочего органа (β), X_2 – угол при вершине ножей рабочего органа (α), X_3 – длина лезвий ножей рабочего органа ($l_л$), X_4 – ширина боковых полос полуковша ($\delta_K^{/}$), X_5 – ширина центральной полосы полуковша (δ_K), X_6 – ширина ковша рабочего органа (S_K), X_7 – площадь боковых стенок полуковша ($S_{б.с.}$), X_8 – толщина лезвий (δ_P).

Во вторую группу "Параметры древесины корней саженцев почвы" входят параметры лабораторного эксперимента, которые можно измерить. К ним относятся: X_9 – диаметр корней саженцев ($d_{кор}$), X_{10}– влажность древесины корней ($W_к$) ,X_{11} – культура, порода саженца, X_{12} – влажность почвы ($W_п$), X_{13} – твердость почвы (ρ).



а) б)

Рисунок 1. Обобщенная (а) и оптимизационная (б) постановка задачи на эксперимент

К третьей группе "Показатели эффективности" относятся характеристики процесса выкопки крупномерных саженцев, которые можно измерить или проконтролировать в ходе экспериментальных исследований. Обычно в качестве выходных критериев принимают величины, характеризующие качество обработки, производительность, экономические затраты, вероятность поломки. В соответствии с этим выделены четыре выходных параметра: $У_1$ – давление рабочей жидкости в напорной гидромагистрали (Р), $У_2$ – качество формирования кома почвы, $У_3$ – твердость кома почвы, $У_4$ – качество среза корней.

На основании исследования с учетом теоретических и экспериментальных данных были отобраны для изучения факторы: X_1 – твердость почвы (ρ , МПа), X_2 – влажность почвы ($W_п$, %). Из выходных параметров эксперимента выделены главные: $У_1$ – давление рабочей жидкости, $У_2$ – качество формирования кома почвы (рис. 1, б).

Необходимо решить следующую экспериментальную задачу оптимизации.

$$P(W_п, \rho) \to \min \qquad (1)$$

Граничные условия технологических факторов, используемых при проведении экспериментальных исследований, приведены в таблице 1. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 2.

Таблица 1. Граничные условия технологических факторов

Код	Фактор	Уровень варьирования			Интервал варьирования, Δ_i
		нижний, $X_i^{(-1)}$	основной, $X_i^{(0)}$	верхний, $X_i^{(+1)}$	
X_1	Твердость	1	1,5	2	0,5
X_2	Влажность	45	60	75	15

$$x_i = (X_i - X_i^{(0)}) / \Delta_i, \qquad (2)$$

где X_i – натуральное значение фактора;

$X_i^{(0)}$ – натуральное значение основного уровня фактора;

Δ_i – интервал варьирования фактора.

Согласно данным таблицы 1 формулы, связывающие нормализованные натуральные значения факторов, имеют вид

$$x_2=(X_2- 1,5) / 0,5; \qquad x_3=(X_3- 15) / 5$$

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_1 Твёрдость почвы, МПа	X_2 Влажность почвы, %	Y_1 Величина давления в напорной гидромагистрали, МПа	Y_2 Качество формирования кома почвы: (+) – удовлетворительное, (-) – неудовлетворительное
1	-1	-1	Y_1	Y_2
2	-1	0	Y_1	Y_2
3	-1	1	Y_1	Y_2
4	0	-1	Y_1	Y_2
5	0	0	Y_1	Y_2
6	0	1	Y_1	Y_2
7	1	-1	Y_1	Y_2
8	1	0	Y_1	Y_2
9	1	1	Y_1	Y_2

Для проведения исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 2), включающая в себя передвижную тележку почвенного канала 1, навеску тележки 2, раму 3, рабочий орган, состоящий из лезвий в виде двух треугольников 4 и полуковша 5 в задней его части, боковых стоек 6. Рабочий орган и боковые стойки образуют двуплечий рычаг, который приводится в движение при помощи двух гидроцилиндров 7.

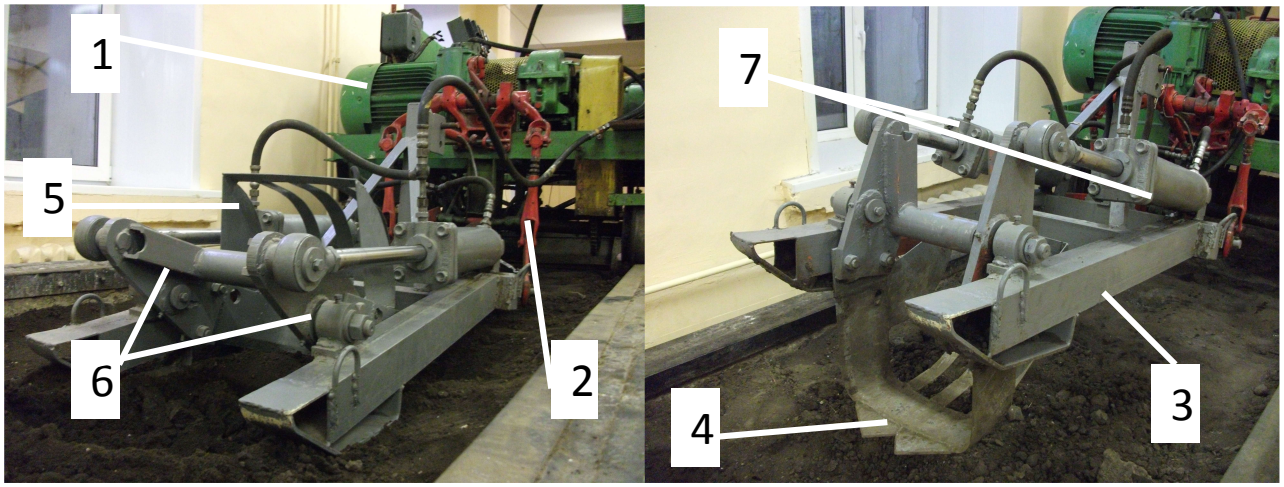
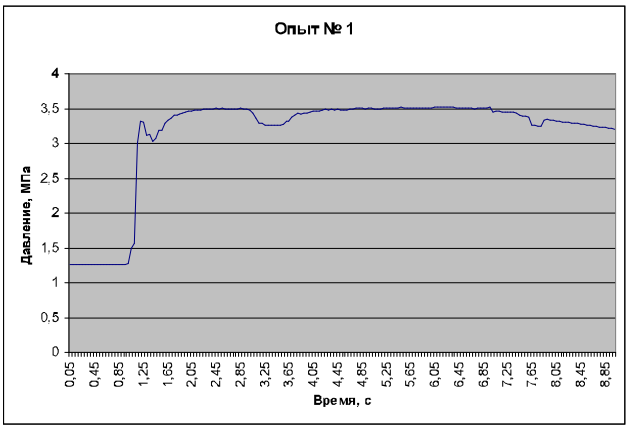


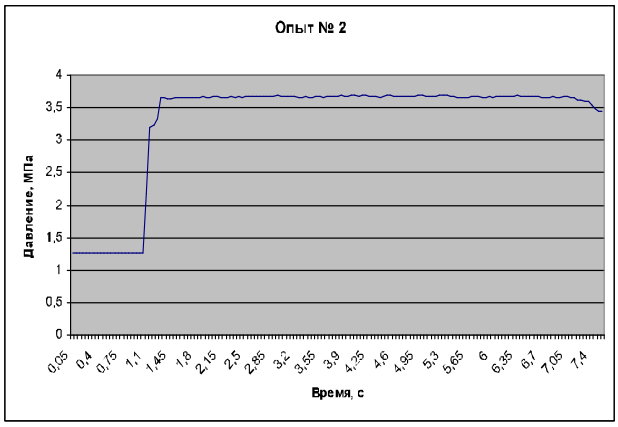
Рисунок 2. Экспериментальная установка выкопочной машины

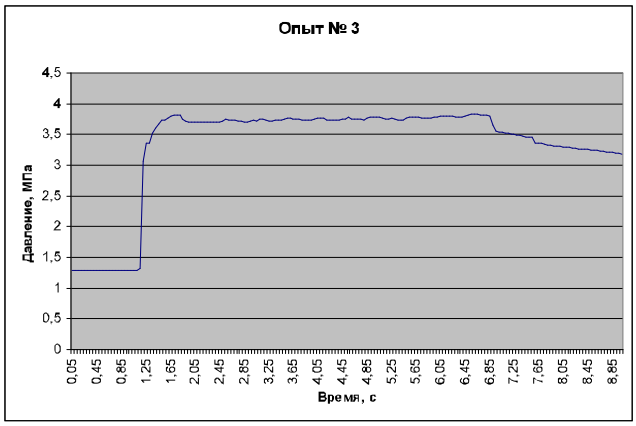
Зависимости давления рабочей жидкости ($У_1$) в зависимости X_1 и X_2, полученные экспериментальным путем в соответствии с методикой планирования эксперимента приведены на рис. 3. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

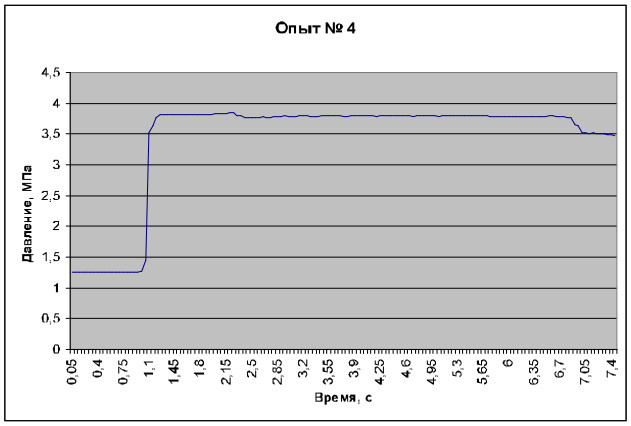
Таблица 3. Результаты эксперимента

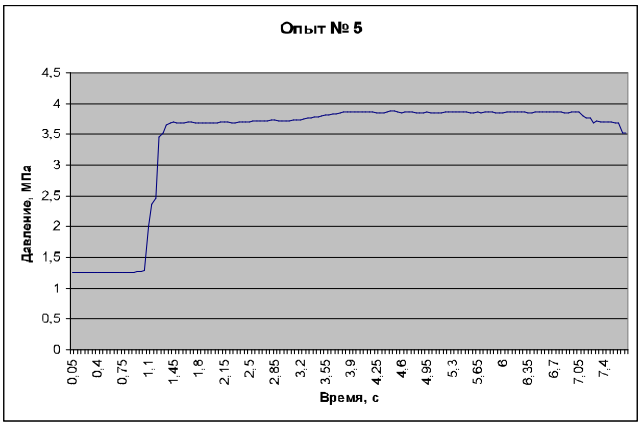
№ опыта	X_1 Твёрдость почвы, МПа	X_2 Влажность почвы, %	Y_1 Величина давления в напорной гидромагистрали, МПа	Y_2 Качество формирования кома почвы: (+) – удовлетворительное, (-) – неудовлетворительное
1	1	45	3,5	–
2	1	60	3,67	–
3	1	75	3,73	–
4	1,5	45	3,80	–
5	1,5	60	3,86	–
6	1,5	75	3,9	+
7	2	45	3,81	–
8	2	60	3,96	+
9	2	75	4,18	+

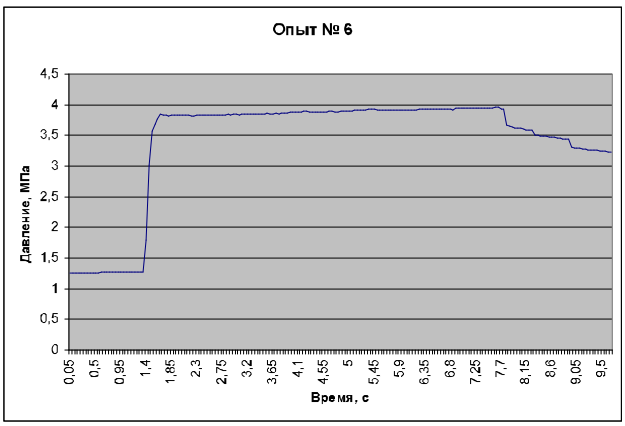

Опыт № 1
Давление, МПа
Время, с

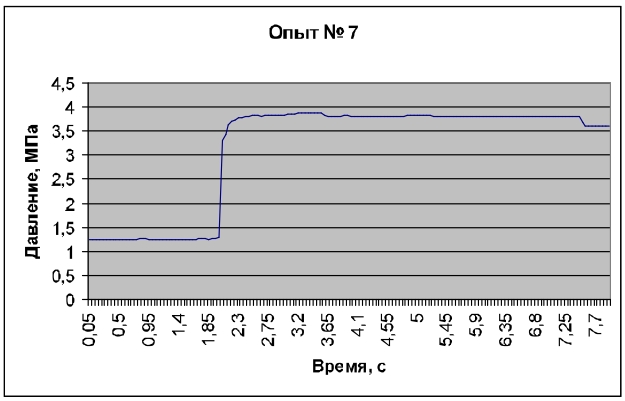

Опыт № 2
Давление, МПа
Время, с

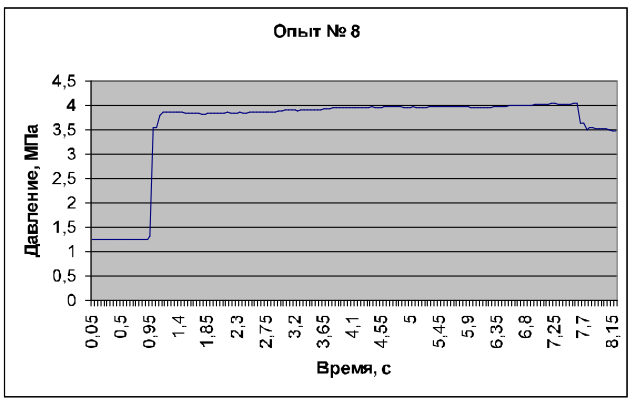

Опыт № 3
Давление, МПа
Время, с


Опыт № 4
Давление, МПа
Время, с


Опыт № 5
Давление, МПа
Время, с


Опыт № 6
Давление, МПа
Время, с


Опыт № 7
Давление, МПа
Время, с


Опыт № 8
Давление, МПа
Время, с

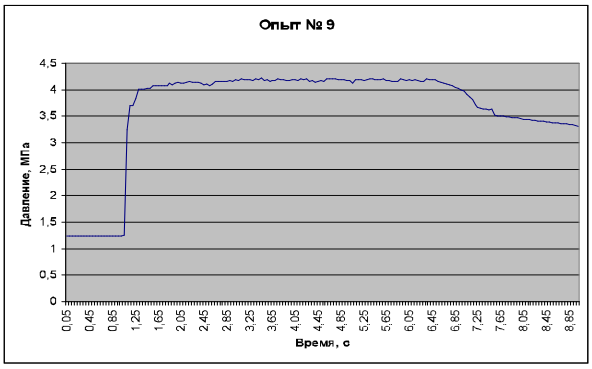


Рисунок 3. Результаты эксперимента согласно матрице планирования

По полученным средним значениям критерия оптимизации Y рассчитана математическая модель в виде линейного уравнения регрессии

$$\overline{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^{K} b_i x_i \,. \qquad (3)$$

Для вычисления коэффициентов регрессионных уравнений основным методом является метод наименьших квадратов (МНК). Этот метод обеспечивает выбор коэффициентов, таким образом, что сумма квадратов отклонений исходных значений критерия оптимизации от вычисленных по уравнению регрессии является наименьшей, т.е.

$$s = \sum_{k=1}^{m} \left[Y_k - \overline{Y}_k \right]^2 \to \min \,. \qquad (4)$$

Здесь Y_k – реальное (полученное на основе эксперимента) значение критерия оптимизации; $\overline{Y}_k$ – значение критерия оптимизации, рассчитанное по уравнению регрессии.

Выбор именно такого условия исходит из соображения удобства применения математического аппарата, а также тем, что возведение отклонений в квадрат подчеркивает роль больших отклонений.

В результате расчетов с использованием пакетов программ Microsoft Excel XP и Statistica 6 получено следующее линейное уравнение регрессии в кодированном виде:

$$\overline{Y} = 2{,}8317 + 0{,}35 \cdot x_1 + 0{,}0078 \cdot x_2 \,, \qquad (5)$$

где x_1 – твердость почвы, МПа; x_2 – влажность почвы, %.

На рис. 4 представлены графики остатков и графики подбора по каждой переменной.

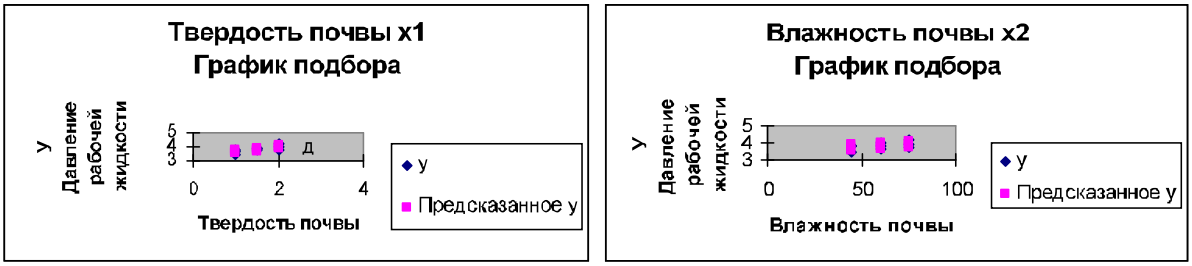


Рисунок 4. Графики остатков и подбора по переменной X_1 и X_2

Следующим этапом является статистический анализ полученной модели, то есть на этом этапе проверяется адекватность представления результатов экспериментов уравнением линейной регрессии, значимость коэффициентов регрессии и их взаимосвязь.

Проверка адекватности модели второго порядка производилась с помощью F-критерия (критерия Фишера). F-тест – оценивание качества уравнения регрессии – состоит в проверке гипотезы H_0 о статистической значимости уравнения регрессии и показателя тесноты связи. Для этого выполняется сравнение фактического $F_{факт}$ и критического (табличного) $F_{табл}$ значений F-критерия Фишера. Если $F_{табл} < F_{факт}$, то H_0 – гипотеза о случайности оцениваемых характеристик отклоняется, и признается их статистическая значимость и надежность. Величина $F_{табл}$ при уровне значимости 0,05 (вероятность 95%) равна 5,14. В результате вычислений получено значение критерия $F_{факт}$=31,62. Следовательно, гипотеза адекватности описания процесса линейным уравнением принимается.

Значимости коэффициентов регрессии определяются с использованием t-критерия Стьюдента. Выдвигается гипотеза H_0 о случайной природе показателей, т.е. о незначительном их отличии от нуля. Сравнивая фактическое и критическое (табличное) значения t-статистики ($t_{табл}$ и $t_{факт}$), принимаем или отвергаем гипотезу. Если $t_{табл} < t_{факт}$, то H_0 отклоняется, т.е. коэффициенты регрессии не случайно отличаются от нуля и сформировались под влиянием систематически действующих факторов. В противном случае природа формирования коэффициентов регрессии признается случайной. В таблице 4 приведены результаты расчета t-статистики. Коэффициенты уравнения значимы с 95 % вероятностью.

Таблица 4. Расчет t-статистики Стьюдента для определения значимости регрессии при $t_{табл}$=2,45

Коэффициент регрессии	Расчетные коэффициенты регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	Коэффициент значим(+)/ незначим (-)
b_0	2,83	0,134	21,13	+
b_1	0,35	0,053	6,62	+
b_2	0,0078	0,002	4,41	+

На рис. 5 изображена поверхность, описываемая построенным уравнением регрессии.

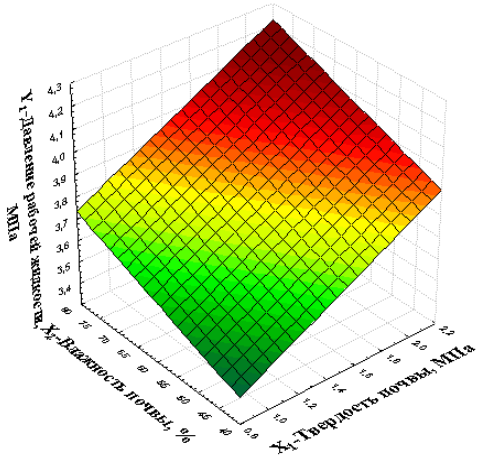


Рисунок 5. Зависимость давления рабочей жидкости от твердости и влажности почвы

Выводы. Таким образом, при увеличении твердости и влажности почвы происходит линейное увеличение давления. Анализ графика показывает, что зависимость давления от твердости почвы и влажности – линейная.

По результатам оптимизации было установлено, что минимальное давление рабочей жидкости в напорной гидромагистрали выкопочной машины при условии формирования цельного кома почвы наблюдается при твердости почвы 1,5 МПа и влажности 75 %.

Список литературы

1. Дручинин Д. Ю. О разведении и восстановлении дубрав в поймах рек // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 2. – С. 6-9.

2. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов: учеб. пособие. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. – 287 с.

3. Горский В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики): учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1978. – 288 с.

4. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

5. Пижурин А. А. Методика планирования экспериментов и обработка их результатов при исследовании технологических процессов в лесной и деревообрабатывающей промышленности: учеб. пособие. – М., 1972. – 71 с.

Рецензенты:

Кочегаров А.В., д.т.н., профессор кафедры «Проектирование механизмов и подъемно-транспортных машин», ФГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Казаров К.Р., д.т.н., профессор кафедры сельскохозяйственных машин, ФГОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет», г. Воронеж.